

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

Ing. Michal Ptáček

PARCIÁLNÍ ŘEŠENÍ HYBRIDNÍHO SYSTÉMU  
S NÍZKOTEPLNÝMI PALIVOVÝMI ČLÁNKY  
A OBNOVITELNÝMI ZDROJI

PARTIAL SOLUTION OF HYBRID SYSTEM  
WITH LOW-TEMPERATURE FUEL CELLS  
AND RENEWABLE SOURCES

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika  
Školitel: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.  
doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.

## Klíčová slova

Nízkoteplotní palivový článek; PEMFC; Hybridní systém; Obnovitelné zdroje energie; OZE; Simulace; Model; Fotovoltaický zdroj energie; FVE; Větrný zdroj; VTE; Atmosférické podmínky.

## Keywords

Low-temperature fuel cell; PEMFC; Hybrid system; Renewable energy sources; RES; Simulation; Model; Photovoltaic energy source; PVPP; Wind energy source; WPP; Atmospheric conditions.

## Místo uložení práce

Práce je k dispozici v Areálové knihovna FEKT, Technická 12, 616 00 Brno

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Současná technologie palivových článků</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Hybridní systémy a nedostatky PEMFC modelů</b>	<b>6</b>
3.1	Parciální simulace PEMFC hybridních systémů . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Současná výroba vodíku</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Cíle práce</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Palivový článek PEMFC a jeho simulace</b>	<b>10</b>
6.1	Nový komplexní model PEMFC . . . . .	10
6.1.1	Stanovení aktivačních ztrát . . . . .	11
6.1.2	Stanovení ohmických ztrát . . . . .	11
6.1.3	Stanovení koncentračních ztrát . . . . .	11
6.1.4	Stanovení parciálních tlaků a jejich regulace . . . . .	12
6.1.5	Stanovení teploty . . . . .	12
6.2	Výsledky simulací . . . . .	13
6.2.1	Samostatný model PEMFC - I. část . . . . .	13
6.2.2	Model PEMFC, reformér a regulace - II. část . . . . .	14
6.2.3	Model PEMFC, reformér, regulace a DC/DC konvertor - III. část . . . . .	16
6.3	Resumé . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Fotovoltaický článek a jeho simulace</b>	<b>18</b>
7.1	Matematický model fotovoltaického modulu . . . . .	18
7.1.1	Verifikace fotovoltaického modelu . . . . .	18
7.2	Výkonová disponibilita a vhodnost veřejných databází . . . . .	19
7.2.1	Simulace fotovoltaického subsystému . . . . .	20
7.3	Resumé . . . . .	21
<b>8</b>	<b>Větrný zdroj energie a jeho simulace</b>	<b>21</b>
8.1	Resumé . . . . .	22
<b>9</b>	<b>Závěr</b>	<b>23</b>
9.1	Splnění jednotlivých cílů práce . . . . .	23
9.2	Souhrn nových poznatků a vlastní přínos . . . . .	24
9.3	Praktické využití . . . . .	25
9.4	Návrh dalšího řešení . . . . .	26
	<b>Použitá literatura</b>	<b>27</b>
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>31</b>
	<b>Publikace autora</b>	<b>32</b>
	<b>Abstract</b>	<b>33</b>



# 1 Úvod

Obnovitelné zdroje energie (OZE) či hybridní systémy nejsou schopny svým výkonem konkurovat konvenční výrobě elektřiny, přesto mohou představovat silný potenciál budoucí energetiky. Například hybridní systémy, založené na kooperaci vodíkových palivových článků a OZE, reprezentují oblast oprávněného zájmu. Význam OZE je zřejmý a na vodíkové technologie se pohlíží s velkou nadějí, jelikož technologický stav palivových článků naznačuje, že je tato oblast opět na svém vzestupu. Do jisté míry tomu přispívají i vlastnosti provozu palivových článků, které korespondují s aktuálními ekologickými požadavky. V blízké budoucnosti bude hlavní využití vodíkových technologií v energetice právě v podobě hybridních systémů či mikrokogeneračních systémů na úrovni rezidencí, a to zejména vzhledem k technickým a ekonomickým aspektům. Samotná kombinace palivových článků a OZE může být do budoucna velmi perspektivní. Proměnlivost výroby energie z OZE může přímo ovlivnit spolehlivost dodávky elektřiny. Díky variabilitě vstupních veličin systému je opodstatněné při návrhu provádět simulaci, jelikož princip výroby elektrické energie u jednotlivých zdrojů je odlišný [1]. Simulací lze rychleji a efektivněji ověřit spolehlivost systému a příznivě tak působit i na ekonomickou část návrhu. Uvedené skutečnosti ukazují legitimní důvod pro provedení simulace hybridního systému, který obsahuje palivový článek a proměnlivé zdroje energie.

## 2 Současná technologie palivových článků

Historie palivového článku, od objevení základního principu, přes prototypy až po dnešní známou konstrukci, je stejně zajímavá, jak tomu bývá i u jiných takto přelomových objevů a zařízení. Seznámení s historickými milníky ve vývoji palivových článků a s významnými fakty vodíkových technologií přináší [2]. Význam uplatnění palivových článků byl a je velmi proměnlivý. V současné době jsou palivové články opět na vzestupu. Významně tomu pomáhají jejich vhodné vlastnosti, které korespondují s aktuálními ekologickými požadavky a s ochranou životního prostředí. Pominou-li se palivové články využívané v automobilovém průmyslu, roste význam hybridních systémů, v nichž články kooperují s jinými obnovitelnými zdroji elektrické energie.

Obecně nejsou hybridní systémy schopny svým výkonem konkurovat konvenční výrobě elektřiny, mohou však představovat silný potenciál budoucí energetiky. Samotné hybridní systémy by se mohly více instalovat v odlehlých oblastech, na ostrovech nebo v některých rozvojových zemích. V těchto zemích by mohlo být někdy vhodnější využívat decentralizovaných zdrojů energie místo výstavby konvenčních zdrojů a související infrastruktury [3]. Aktuální průzkum světového průmyslového trhu [4] přináší analýzu jejíž výsledky naznačují, že v následujících letech se očekává silný nárůst stacionárních palivových článků. Z historického přehledu a z aktuálního vývoje je zřejmé, že v blízké budoucnosti budou v energetice palivové články pouze doplňkové zdroje, které pracují v hybridním systému nebo spolupracují s kogeneračními jednotkami [2].

Stejně jako u jiných zařízení, i palivové články se dělí podle svých specifických provozních parametrů, jež jsou přímo závislé na samotné konstrukci článků či souvisejí s elektrochemickými ději, které v nich probíhají. Za základní rozdělení palivových článků je možné považovat například dělení podle použitého elektrolytu, způsobu provozování, podle tlaku, výkonu, provozní teploty nebo použitého paliva. Popisné rozdělení, schémata a chemické reakce palivových článků přináší například [5]. Podrobně představuje také charakteristiky jednotlivých palivových článků stacionárních zdrojů

s různými elektrolyty. Principiální schéma článku s polymerní membránou (PEMFC), jednotlivé probíhající chemické procesy nebo matematický popis jsou podrobně objasněny v [2].

V rámci kategorie stacionárních palivových článků existují nebo se připravují PEMFC řešení, kdy jsou články využity přímo jako primární zdroj elektrické energie nebo pracují jako doplňkový zdroj energie, který funguje jako součást hybridního systému nebo se kombinuje s kogeneračními jednotkami. Vznikají i technická řešení hybridních systémů, kdy PEMFC spolupracují s dalšími zdroji energie a bývají uplatňovány především jako záložní zdroje elektrické energie nebo jsou kombinovány s malými kogeneračními jednotkami. Tyto systémy jsou pak vhodné u komplexů budov či nebytových prostor, u kterých je obecně zaručen celoroční odběr tepla. Technické náležitosti jednotlivých PEMFC konceptů jsou blíže představeny v kapitole 3. Představení konkrétních provozovaných aplikací, které využívají palivové články jako primární nebo doplňkový zdroj energie přináší [2, 5]. Uvedené skutečnosti pak jednoznačně poukazují na oprávněnost zabývat se blíže studiem a výzkumem článků typu PEMFC.

### 3 Hybridní systémy a nedostatky PEMFC modelů

Hybridní systém představuje energetický blok (systém), který se skládá z jednotlivých zdrojů energie (subsystém) a který může nebo nemusí být připojený přímo k distribučním sítím. Hybridní systém obsahuje ovšem i další zařízení (subsystém), která jsou nezbytná pro spolehlivý provoz uvažovaného systému jako celku. U hybridních systémů často dochází ke kombinaci spolupráce několika zdrojů energie, které pracují na různých fyzikálních principech. Proto ve světě existuje řada různých koncepcí. Jednotlivé koncepty systémů nabízejí i řešení, kdy zdrojem energie není pouze zdroj elektrické energie, ale i zdroje produkující energii tepelnou. Zdroje mohou pracovat například v rámci kogenerační jednotky [6]. Nejčastější koncept je založen výhradně na kooperaci olověných baterií s obnovitelnými zdroji energie, zejména zdroji fotovoltaickými a větrnými [7, 8, 9, 10]. Samotná implementace jednotlivých zdrojů a dalších nezbytných zařízení se nepochybně odvíjí od konkrétního požadavku na provoz hybridního systému. V některých zemích jsou realizovány hybridní systémy, které využívají LT-PEMFC (dále jen PEMFC) [9, 11, 12, 13]. Vzhledem k tomu, že se práce zabývá parciálním řešením hybridních systémů, které řeší spolupráci PEMFC a OZE, jsou detailní analýzy podrobeny právě tyto koncepty. Koncepty provozovaných systémů se navzájem odlišují, což umožňuje lépe specifikovat nedostatky PEMFC modelů, které slouží pro návrh nového matematického modelu PEMFC. Označení PEMFC hybridní systém bude, pro přehlednou interpretaci v dalším textu práce, odpovídat hybridnímu systému s PEMFC. Kompletní přehled jednotlivých konceptů uvádí [2].

#### 3.1 Parciální simulace PEMFC hybridních systémů

Prostřednictvím matematické simulace je možné věrohodně ověřit spolehlivost systému a případně i eliminovat jeho nevhodnou výkonovou parametrizaci. Správně provedená simulace může příznivě působit i na ekonomickou část návrhu. Navíc lze efektivněji analyzovat provoz systému a jeho spolehlivost při náhlých změnách dodávek elektrické energie u uvažovaných zdrojů energie. Již simulace samotného PEMFC představuje značně rozsáhlou problematiku, která zasahuje napříč několika obory, což jednoznačně potvrzuje i existence rozmanitých technických přístupů a řešení. Jednotlivé modely vykazují vzájemné difference ve smyslu odlišného respektování konkrétních fyzikálních a

chemických závislostí. Modely mohou zavádět i další různé zjednodušující předpoklady. Všechny přístupy závisí na dostupných vstupních parametrech pro matematický model, ale závisí i na tom jaké výstupní parametry jsou od modelu očekávány a požadovány. Tím je ovlivněn již samotný přístup k matematické definici modelu při zachování dostatečné přesnosti získaných výsledků.

Matematické modelování samotného PEMFC lze realizovat pomocí statického modelu, jak ukazuje například [14], kde jsou některé veličiny definovány jako konstantní. Přitom statické modelování simuluje pouze jeden konkrétní ustálený stav PEMFC. Statické modely tak vytvoří základní představu, jakých hodnot mohou dosahovat určité elektrické a neelektrické veličiny, a to třeba při jmenovitém provozu PEMFC nebo během nestandardních podmínek. Pro komplexnější využití výsledků simulací je však nezbytné realizovat výpočty pomocí modelu, který řeší dynamické chování PEMFC.

V současnosti existuje řada přístupů dynamického modelování PEMFC, které respektují změny časově závislých veličin, jako například provozní teplotu, jednotlivé parciální tlaky, vnitřní odpor, napěťové ztráty, životnost a další. Nelze ovšem konstatovat, že by jednotlivé přístupy uvažovaly všechny tyto veličiny současně. Naopak některé z nich jsou uvažovány jako neměnné v čase. Jedním z možných přístupů jako modelovat dynamiku PEMFC je definování elektrického ekvivalentního obvodu, který by odpovídal probíhajícím procesům v článku [15, 16]. Ekvivalentní obvod charakterizující dynamiku PEMFC je přiblížen v [16]. Dynamika PEMFC je ovlivněna procesy, které se vyskytují na rozhraní mezi elektrodou a membránou. Zejména pak procesy u katody, kde se vyskytuje vysoký přenosový náboj [17]. V odborné literatuře [18] je dynamika PEMFC také modelovaná pomocí ekvivalentního obvodu. Aktivační ztráty, teplota nebo vnitřní odpor palivového článku jsou realizovány pomocí empiricky stanovených vztahů. Také v [11] jsou aktivační ztráty modelovány pomocí náhradního obvodu. Je zde uveden i přehled grafických průběhů konkrétních statických stavů PEMFC. Konkrétně závislosti proudu článku na napětí pro jeho různé provozní teploty, případně i velikost tlaku vodíku.

Dynamické změny parciálního tlaku a napětí článku jsou modelovány pomocí diferenciálních rovnic prvního řádu. Aktivační ztráty a hodnota vnitřního odporu je stanovena na základě empiricky určených vztahů. Stejně tak je tomu například i u elektrolyzáru, který je popsán pomocí empiricky určeného vztahu. Odborný článek obsahuje i obecné vyjádření jednotlivých koeficientů pro výpočet aktivačních ztrát palivového článku [19]. Pokud bude model postaven výhradně na empiricky stanovených vztazích, problém může nastat s aplikovatelností získaných rovnic na další typy článků, než pro které byly původně verifikovány.

Další nedostatečně řešenou problematikou je vyprodukovaná tepelná energie pomocí PEMFC. Ani dříve zmíněný koncept v [20] neřešil otázku vyprodukované tepelné energie a provozní teplota PEMFC byla uvažována konstantní. Řada publikovaných přístupů také uvažuje provozní tlak PEMFC za konstantní. Problematika nelineární regulace anodového a katodového tlaku PEMFC je řešena například v [19], kdy se pro vysoce nelineární chemické procesy využije přesné linearizace. Při náhlých změnách zatížení PEMFC jsou tak jednotlivé tlaky na straně anody a katody řízeny více komplexněji, a to prostřednictvím parciálních tlaků, tedy pomocí vstupních toků a zátěžného proudu. Tímto řízením lze dosáhnout lepší životnosti článku, když je minimalizován membránový tlakový rozdíl mezi anodou a katodou. Lze konstatovat, že existuje řada nedostatků, kterými disponují modely PEMFC. V návaznosti na konkretizovaný popis nedostatků je v kapitole 6 navržen a analyzován nový model PEMFC, jež tyto nedostatky eliminuje.

Kapitola informuje o nedokonalostech, kterými trpí aktuální matematické modely

PEMFC nebo hybridní systémy využívající PEMFC. Některé skutečnosti poukazují na nutnost a oprávněnost vytvořit nový zdokonalený model PEMFC, který by současně uvažoval jednotlivé napěťové ztráty, změnu vnitřního odporu, změnu parciálních tlaků a dále by také respektoval změnu provozní teploty článku a skutečnost, že je vodík nejčastěji vyráběn ze zemního plynu. Představení provozovaných energetických systémů obsahující PEMFC a specifikující nedostatky modelů PEMFC jsou autorem publikovány formou review v [1]. Parciální řešení hybridního systému poukazuje také na nutnost tvorby matematických modelů OZE a potřebu zabývat se jejich výkonovou disponibilitou a vhodností hydrometeorologických modelů, jakožto vstupních dat.

## 4 Současná výroba vodíku

V současnosti je vodík často vnímán jako ideální nosič energie, který by našel významnější uplatnění v budoucí energetice, protože při jeho spalování nevznikají oxidy síry nebo oxid uhličitý. Spalováním vodíku vznikají prakticky pouze oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  a voda. Ve vodíku nebo v kombinaci vodíku a stacionárních palivových článků se vidí čistý a do budoucna perspektivní zdroj energie. Na druhou stranu, největší celkové zásoby vodíku v sobě ukrývá voda a uhlovodíkové látky (fosilní paliva). Výroba vodíku je poměrně rozmanitá a existuje mnoho metod, jak vodík získat. Výrobu vodíku lze v podstatě rozdělit na výrobu vodíku využívající fosilní paliva a výrobu využívající vodu. Je nutné si uvědomit, že i dnešní elektrárny s palivovými články využívají vodík, který je vyráběn výhradně z fosilních paliv. Jednotlivé metody výroby se od sebe liší základním principem získávání vodíku a použitím různých vstupních surovin. Nejrozšířenější metody využívají jako vstupní surovinu zemní plyn. Běžně využívanou surovinou je i ropa, respektive kapalné a plynné frakce, které vznikají při její těžbě. K rozšířenějším metodám patří i zplyňování uhlí [21, 22, 23, 24, 25].

Jednou z cenově nepřijatelnějších metod jak vyprodukovat vodík, je parní reformování zemního plynu. Rovněž je nutné respektovat, že palivový článek potřebuje pro správný provoz vodík s dostatečnou čistotou. V současné době lze proces parního reformování použít i pro menší stacionární zdroje. V souvislosti se skladováním vodíku je třeba brát v úvahu jeho charakteristické vlastnosti, proto jsou na skladovací systémy kladeny i zvýšené konstrukční a bezpečnostní požadavky. Literatura [2] informuje o základních metodách výroby vodíku a společně s [5] doplňují přehled výrobních procesů a technologií uskladnění vodíku.

## 5 Cíle práce

Práce se zabývá parciálním řešením hybridního systému využívající nízkoteplotní palivový článek a OZE. Jeden z hlavních cílů práce je zaměřen na návrh a analýzu nového matematického PEMFC modelu, jenž by vedl k eliminaci konkrétních nedostatků. Aktuální problematiku představují také matematické popisy jednotlivých OZE. Dalším cílem práce jsou tvorba komplexního matematického popisu fotovoltického modulu, hodnocení výkonové disponibility těchto zdrojů a návrh větrného zdroje energie. Úspěšné vyřešení hlavních cílů práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů.

### Specifikace nedostatků současných systémů a modelů

Nejdříve je nutné identifikovat správné zákonitosti, závislosti a vazby, vedoucí ke správnému modelování PEMFC a hybridního systému jako celku. Na základě review provozovaných nebo modelovaných konceptů hybridních systémů v energetice pak provést



specifikaci hlavních nedostatků modelů PEMFC. Specifikace nedostatků umožní vytvoření nového zdokonaleného dynamického modelu PEMFC.

### **Návrh a tvorba nového modelu PEMFC**

Jedním z hlavních cílů je navrhnout a vytvořit nový matematický model PEMFC v MATLAB® a v MATLAB®/Simulink, který umožní vyšetřování jednak ustálených stavů PEMFC, ale také dynamického chování jeho elektrických a neelektrických veličin, a to v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Současné verifikované modely PEMFC obsahují specifické nedostatky, zejména díky zavádění zjednodušujících předpokladů, když některé dynamicky se vyvíjející veličiny jsou považovány za konstantní a některé závislosti nejsou uvažovány vůbec. Vytvořený model má proto představovat zdokonalené řešení vycházející z těchto verifikovaných modelů, jenž eliminuje hlavní nedostatky. Nový model má také respektovat skutečnost, že vodík je nejčastěji vyráběn ze zemního plynu, tudíž má obsahovat i model reforméru a jednoduchou regulaci provozních tlaků uvnitř článku. Nový model má být rozšířen také o model DC/DC konvertoru, což přispěje k jeho komplexnímu využití v rámci budoucích simulací hybridního systému.

### **Analýza provozních stavů PEMFC**

Nový model PEMFC se využije pro analýzu různých ustálených provozních stavů palivového článku. Na modelu budou provedeny experimenty vedoucí k vyšetření dynamických změn napětí, výkonu a teploty článku pro dlouhodobý simulační scénář. Model PEMFC rozšířený o model reforméru bude podroben tepelným experimentům, které ukážou vliv změny tepelné kapacity či tepelného odporu článku na jeho provozní teplotu a výstupní výkon. Další provedené experimenty budou analyzovat elektrické poměry na DC/DC konvertoru a budou informovat o dalších neelektrických veličinách článku.

### **Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu**

Dalším cílem je navrhnout a vytvořit model fotovoltaického modulu v MATLAB®, který bude založen na parametrizaci výhradně ze svých štitkových hodnot, čímž se docílí snadné a hlavně praktické aplikovatelnosti. Vytvořený model má respektovat i teplotní závislost jednotlivých vnitřních odporů fotovoltaického modulu, což jednotlivé modely často neuvažují. Rovněž má být implementován iterační výpočet odporů využívající pouze štitkových hodnot.

### **Analýza navrženého fotovoltaického modulu**

Vytvořený model fotovoltaického modulu bude následně podroben verifikaci. Posléze bude provedena simulace fotovoltaického subsystému, který má navíc v simulacích vhodně implementovat reálně změřená hydrometeorologická data.

### **Analýza výkonové disponibility fotovoltaického zdroje a ověření vhodnosti veřejné databáze**

Dalším cílem je tvorba aplikace v programu MATLAB®, která má zpracovat a vyhodnotit data získaná z kontinuálního měření statického fotovoltaického modulu. Vyhodnocení má poskytnout informace o výkonové disponibilitě fotovoltaického zdroje v dané lokalitě, což je vzhledem k charakteru těchto zdrojů cenná znalost. Aplikace má dále umožnit porovnání slunečního záření dopadajícího na referenční fotovoltaický modul s hodnotami množství sluneční energie obsažených ve veřejně přístupné databázi.

### **Model větrného zdroje energie**

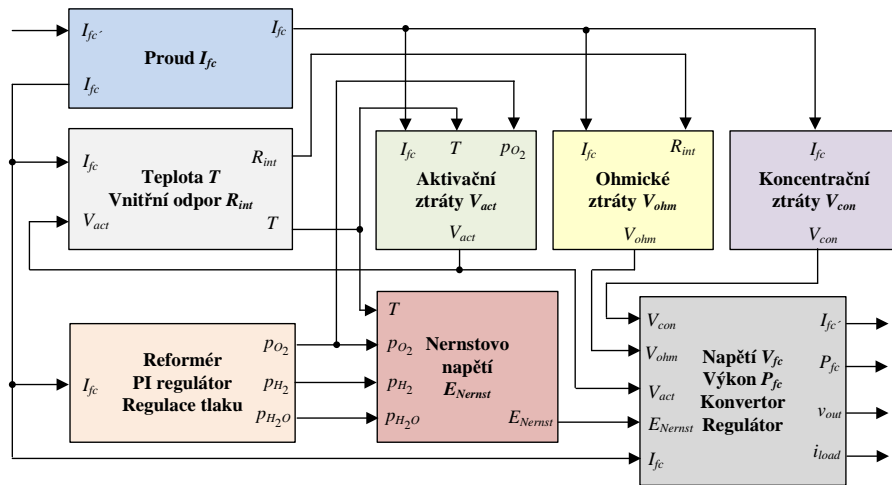
Cílem práce je také popsat a simulovat zjednodušený model větrného zdroje energie a nastínit následné práce, které by vedly k jeho budoucímu zdokonalení a rozšíření.

## 6 Palivový článek PEMFC a jeho simulace

V této kapitole je představen nový matematický model PEMFC, který využívá také vytvořené modely reforméru a DC/DC konvertoru. Dále jsou prezentovány hlavní výsledky provedených simulací. Kompletní popis nového modelu a rozšiřujících modelů je uveden v disertační práci [2].

### 6.1 Nový komplexní model PEMFC

Matematická simulace palivových článků představuje velmi rozsáhlou víceoborovou problematiku. Jednotlivé matematické modely jsou proto odlišné a ukazují různé technické přístupy a řešení. Tyto přístupy mohou jednak odlišně respektovat fyzikální a chemické závislosti nebo mohou obsahovat několik dalších zjednodušujících předpokladů. Všechny přístupy jsou závislé na skutečnosti, jaké vstupní parametry daný matematický model uvažuje, respektive jaké výstupní parametry jsou od modelu očekávány a požadovány. Tyto okolnosti ovlivní samotný přístup matematické definice modelu se zachováním dostatečné přesnosti získaných výsledků. Na druhou stranu však existují odborné publikace s odlišnými výzkumnými cíli, které se zabývají nízkoteplotními palivovými články. Následující Obr. 6.1 [26] ukazuje blokové uspořádání nově vytvořeného dynamického modelu nízkoteplotního palivového článku typu PEMFC, jež bylo autorem publikováno v [26]. Nový model PEMFC je vytvořený v MATLAB<sup>®</sup> a v MATLAB<sup>®</sup>/Simulink.



Obr. 6.1: Blokové uspořádání nového komplexního modelu PEMFC [26]

Modelovaný PEMFC je složen z 80-ti identických a vzduchem chlazených palivových článků, které využívají polymerní membránu Nafion - 117. Díky sériovému propojení jednotlivých článků je při nominální provozní teplotě  $T_n = 343,15$  K dosaženo celkového elektrického výkonu téměř 2,0 kW. Popis je koncipovaný takovým způsobem, aby umožňoval analýzu elektrických a neelektrických veličin v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Vytvořený model představuje zdokonalené řešení vycházející z validovaných modelů PEMFC, eliminuje ovšem hlavní nedostatky těchto modelů. Model využívá změny jednotlivých parciálních tlaků reaktantů a respektuje vliv všech napěťových ztrát, tj. aktivačních ztrát, ohmických ztrát a koncentračních ztrát. Dále uvažuje vliv změny vnitřního odporu v závislosti na změnách proudového zatížení a teploty. Zahrnuje také změnu samotné provozní teploty, jež navíc zohledňuje vliv všech základních napěťových ztrát a konvenci tepla do okolí.

K modelu PEMFC je dále implementován model reforméru zohledňující skutečnost, že potřebné palivo pro PEMFC se vyrábí ze zemního plynu. Vhodná implementace umožňuje řízení molárního toku vodíku  $q_{H_2}^{in}$  a kyslíku  $q_{O_2}^{in}$ , a to v závislosti na aktuálním výkonu PEMFC. Výstupní napětí PEMFC není konstantní, proto je model PEMFC doplněn o model snižujícího DC/DC konvertoru, který je řízen pomocí regulátoru a který udržuje napětí 24 V DC. Využití konvertoru přispívá ke komplexnímu využití modelu jako celku v rámci budoucích simulací hybridního systému.

### 6.1.1 Stanovení aktivačních ztrát

Vzhledem k tomu, že vytvořený matematický model PEMFC využívá membránu s označením Nafion - 117, jsou i aktivační ztráty  $V_{act}$  stanoveny pro obdobný typ palivových článků. Konkrétně [27] přináší porovnání publikovaných a verifikovaných koeficientů  $\xi_1$  až  $\xi_4$  a snaží se o modifikaci a zobecnění podmínek plynoucích pro ustálený stav elektrochemického modelu, jež byly specifikovány pro palivové články Ballard.

$$V_{act} = -\xi_1 - T [\xi_2 + \xi_3 \cdot \ln(c_{O_2}) + \xi_4 \cdot \ln(I_{fc})], \quad (6.1)$$

kde  $V_{act}$  představuje aktivační ztráty palivového článku (V),  $T$  je absolutní teplota palivového článku (K),  $\xi_i$  představují empirické koeficienty aktivačních ztrát palivového článku ( $i=1, 2, 3$  a  $4$ ),  $c_{O_2}$  je koncentrace kyslíku na katodovém rozhraní membrána-plyn ( $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), jež je závislá na parciálním tlaku kyslíku a provozní teplotě palivového článku [16, 27], a  $I_{fc}$  je proud palivového článku (A). Jednotlivé empirické koeficienty z rovnice jsou definují [19, 27].

### 6.1.2 Stanovení ohmických ztrát

Vytvořený matematický model PEMFC využívá membránu s označením Nafion - 117 s ekvivalentní hmotností  $EW = 1.100$ . Významným faktorem pro využití nafion membrány pro matematické simulace je skutečnost, že existuje řada publikací, které přináší experimentální vyjádření vnitřního odporu a vodivosti této membrány a že je membrána nafion u PEMFC palivových článků poměrně rozšířená [27]. Pro stanovení ohmických ztrát palivového článku se využijí rovnice určené přímo pro nafion membránu. Následující vztah vyjadřuje rezistivitu membrány

$$\rho_M = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03 \left( \frac{I_{fc}}{A} \right) + 0.062 \left( \frac{T}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{fc}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \Psi - 0.634 - 3 \left( \frac{I_{fc}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T-303}{T} \right) \right]}, \quad (6.2)$$

kde  $\rho_M$  je specifická rezistivita membrány ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),  $A$  je aktivní plocha jednoho samostatného palivového článku ( $\text{cm}^2$ ) a  $\Psi$  je polo-empirický parametr představující efektivní obsah vody membrány. Polo-empirický parametr v ideálním případě, tj. relativní hydratace  $RH = 100$  % membrány, může dosahovat hodnoty 14. V případech, kdy se jedná o supersaturované stavy dosahuje parametr hodnoty až 22 nebo 23 [16, 27, 28].

### 6.1.3 Stanovení koncentračních ztrát

Koncentrační ztráty, někdy také ztráty způsobené přepravou či transportem hmoty [29], se nejčastěji vyjadřují pomocí Fickova zákona [30, 31], Stefan-Maxwellovy rovnice či modelu prášného plynu (DGM) [30]. Transport reaktantů k povrchu elektrody

(či katalyzátoru) je limitován difúzí v pórech a rychlostí jakou jsou reaktanty spotřebovávány. Koncentrační ztráty palivového článku je možné vyjádřit pomocí následujícího vztahu [14, 17, 19]

$$V_{con} = -\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left( 1 - \frac{J}{J_L} \right), \quad (6.3)$$

kde  $V_{con}$  představuje koncentrační ztráty palivového článku (V),  $R$  je univerzální plynová konstanta ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $n$  je počet elektronů (vztážený na počet reagující iont, respektive molekulu),  $F$  je Faradayova konstanta ( $\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $J$  je aktuální proudová hustota ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) a  $J_L$  je limitní proudová hustota ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ).

#### 6.1.4 Stanovení parciálních tlaků a jejich regulace

Obecně lze vyjádřit, že molární tok  $q_x$  představuje časovou změnu počtu molů  $n_x$  v daném kanále [32]. Následující rovnice představuje vyjádření parciálního tlaku určitého reaktantu  $x$ , jež je využito v matematickém modelu

$$\frac{V}{R \cdot T} \frac{dp_x}{dt} = q_x^{in} - k_x \cdot p_x - q_x^r, \quad (6.4)$$

kde  $V$  je objem daného kanálu palivového článku ( $\text{dm}^3$ ),  $dp_x$  představuje změnu tlaku reaktantu  $x$  (atm),  $dt$  představuje změnu času (s),  $q_x^{in}$  je vstupní molární tok daného reaktantu  $x$  ( $\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $k_x$  je molární konstanta reaktantu  $x$  ( $\text{kmol} \cdot \text{atm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $q_x^r$  je reagující molární tok daného reaktantu  $x$  ( $\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Je nutné si uvědomit, že výrazné rozdíly mezi parciálním tlakem vodíku a parciálním tlakem kyslíku mohou způsobit těžké poškození polymerní membrány [19]. Koncepce regulace tlaku je navržena podle [33], kde je výstupní tlak udržován na požadované hodnotě  $p_{ref}$  (atm) podle referenčního toku  $q_x^{ref}$ . Regulaci tlaku popisuje následující vyjádření a jednotlivé tlaky jsou regulovány na hodnotu 1,0 atm. Referenční tok lze chápat jako

$$q_x^{ref} = q_x^{in} - [k_x \cdot (p_x - p_{amb})], \quad (6.5)$$

kde  $q_x^{ref}$  je referenční množství molárního toku daného reaktantu  $x$  pro konkrétní zatížení palivového článku ( $\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $p_{amb}$  je tlak okolí (atm). Při provozu palivového článku je důležité i vysoké využití jednotlivých reaktantů, čímž lze dosáhnout nižších provozních nákladů a příznivějších požadavků na kompresor [34]. Platí

$$U_x = \frac{q_x^{in} - q_x^{out}}{q_x^{in}}, \quad (6.6)$$

kde  $U_x$  je faktor využití daného reaktantu  $x$  (-) a  $q_x^{out}$  je výstupní molární tok daného reaktantu  $x$  ( $\text{kmol} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Regulace využívá jednotlivé parciální tlaky  $p_x$ , referenčního molárního toku  $q_x^{ref}$  a časového zpoždění.

#### 6.1.5 Stanovení teploty

Znalost provozní teploty palivového článku a jejího vývoje představuje velmi podstatnou část z celkového vyšetřování, neboť téměř všechny početní vztahy popisující článek mají vazbu právě na jeho teplotu. V matematickém modelu PEMFC se využívá následujícího popisu

$$\dot{Q} = N_0 (R_{act} + R_{int} + R_{con}) \cdot I_{fc}^2 = C_t \frac{dT}{dt} + \frac{T - T_a}{R_t}, \quad (6.7)$$

kde  $\dot{Q}$  jsou celkové tepelné výkonové ztráty (W),  $N_0$  je počet palivových článků v sérii,  $R_{act}$  je odpor aktivačních ztrát palivového článku ( $\Omega$ ),  $R_{int}$  je vnitřní odpor palivového článku ( $\Omega$ ),  $R_{con}$  představuje odpor koncentračních ztrát palivového článku ( $\Omega$ ),  $C_t$  je tepelná kapacita palivového článku ( $J \cdot K^{-1}$ ),  $dT$  představuje změnu teploty palivového článku (K),  $T_a$  je teplota okolí (K) a  $R_t$  je absolutní tepelný odpor palivového článku ( $K \cdot W^{-1}$ ).

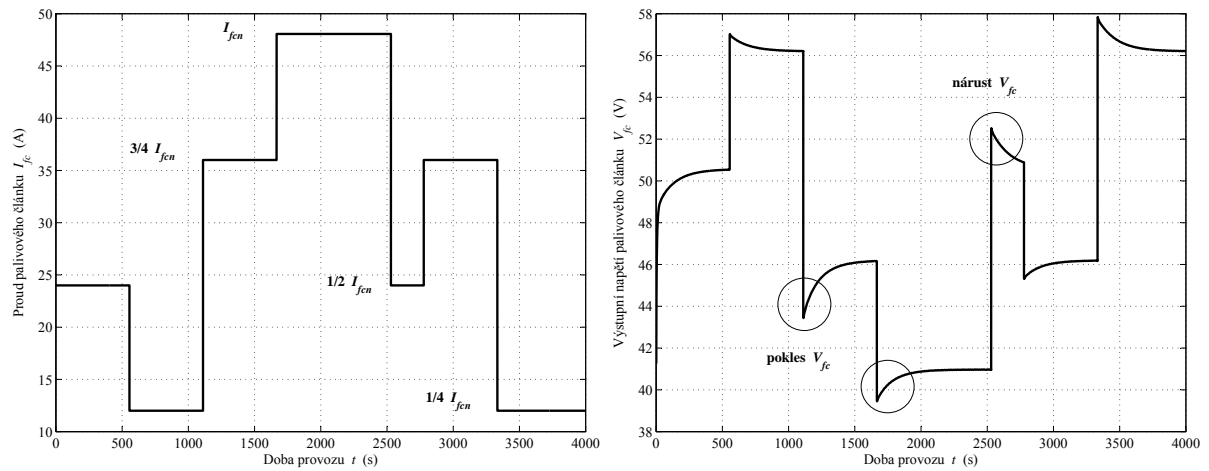
Při reálném provozu palivového článku nejsou teplota, tlak či koncentrace reakčních plynů konstantní, což má přímý vliv na napětí a účinnost. Je tedy důležité vědět, jakých parametrů lze dosáhnout při různých teplotách, tlacích či koncentracích plynů. Další vzájemné vazby, vyplývající matematické rovnice a konkrétní stanovené hodnoty použité při simulaci, jsou uvedeny v disertační práci [2]

## 6.2 Výsledky simulací

Analýza dynamického chování PEMFC je rozdělena do tří částí, které pak korespondují s konceptem jednotlivých provedených experimentů, při kterých je využito nového modelu PEMFC a které ukazují vývoje jednotlivých elektrických a neelektrických veličin článku v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Pro každou část je vytvořena samostatná testovací sekvence pulzů představující jednotlivá proudová zatížení PEMFC. Sekvence pulzů je navržena tak, aby byly respektovány významné a náhlé změny v zatížení. Jsou proto přítomny poklesy a nárůsty odebíraného proudu. Celková délka sekvence pulzů je volena 4.000 s, což představuje více než hodinový provoz PEMFC. Významné změny zatížení a dlouhá doba provozu korespondují s hlavním účelem vyšetřování, to je analyzovat vývoj zvolených veličin v rámci dlouhého časového intervalu.

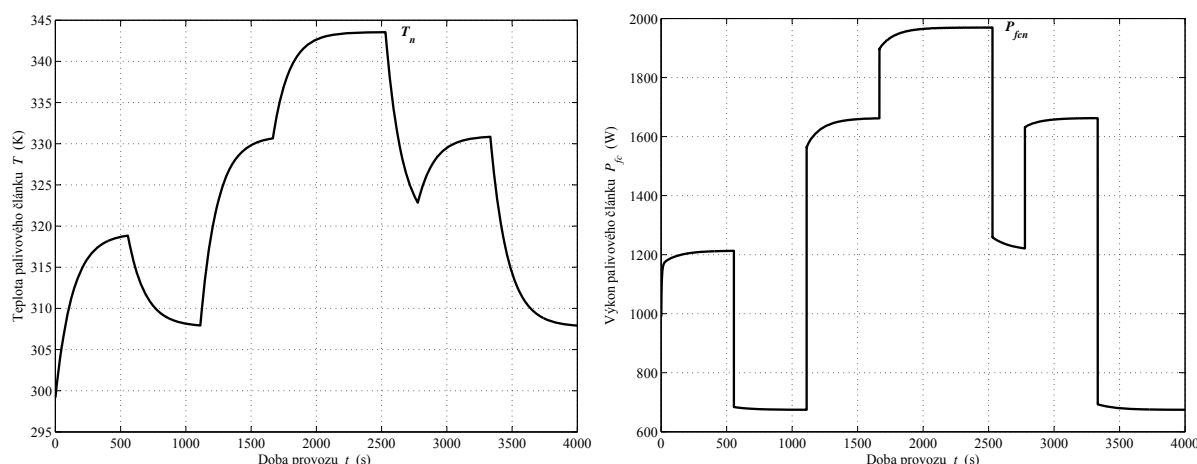
### 6.2.1 Samostatný model PEMFC - I. část

První část analýzy představuje výsledky simulací, které jsou realizovány pouze na samostatném modelu PEMFC. Jelikož nejsou další modely uvažovány, odpovídá zátěžný proud přímo proudu palivového článku  $I_{fc}$ . Pro simulaci průběhů výkonu  $P_{fc}$ , napětí  $V_{fc}$  a teploty  $T$  článku je navržen testovací zátěžný proud, který ukazuje Obr. 6.2 (vlevo).



**Obr. 6.2:** Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud využitý pro vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC (vlevo) a průběh napětí PEMFC (vpravo)

Změny zátěžného proudu a provozních podmínek obecně vedou ke skutečnosti, že i výstupní napětí palivového článku není neměnné. Obr. 6.2 (vpravo) zachycuje vývoj napětí PEMFC. Průběh napětí demonstruje skutečnost, že při zvýšení zátěžného proudu dochází k rychlému poklesu napětí. Naproti tomu pokles zatížení, vede k napěťovým nárůstům. Tento pokles nebo nárůst trvá tak dlouho, dokud PEMFC není v ustáleném stavu. Vývoj teploty PEMFC pro různé zátěžné proudy je modelován stejnou funkcí, liší se však svojí limitní hodnotou. Vzhledem k tomu, že změna zatížení je realizována skokově, je ustálený stav odvislý od ustálení provozní teploty PEMFC. Následující Obr. 6.3 ukazuje vývoj teploty (vlevo) a výkonu (vpravo) PEMFC.



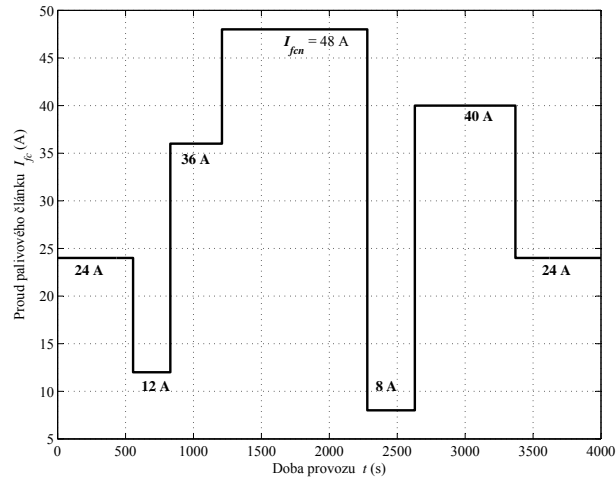
**Obr. 6.3:** Průběh provozní teploty PEMFC (vlevo) a průběh výkonu PEMFC (vpravo) pro navržený zátěžný proud určený k vyšetření dynamického chování samostatného modelu PEMFC

Rychlost růstu či poklesu teploty palivového článku se odvíjí od velikosti proudu palivového článku. Pokud článek nedosáhne své nominální teploty není schopen dodávat nominální výkon. Pokud by PEMFC pracoval například ve spojení s mikrokogenerační jednotkou, může se teplo produkované provozem PEMFC efektivně využít v tepelném výměníku pro ohřev teplé užitkové vody. Křivka výkonu je důležitá například pro návrh systémů, které využívají PEMFC. Ukazuje totiž výkonové chování v čase pro různé provozní podmínky.

## 6.2.2 Model PEMFC, reformér a regulace - II. část

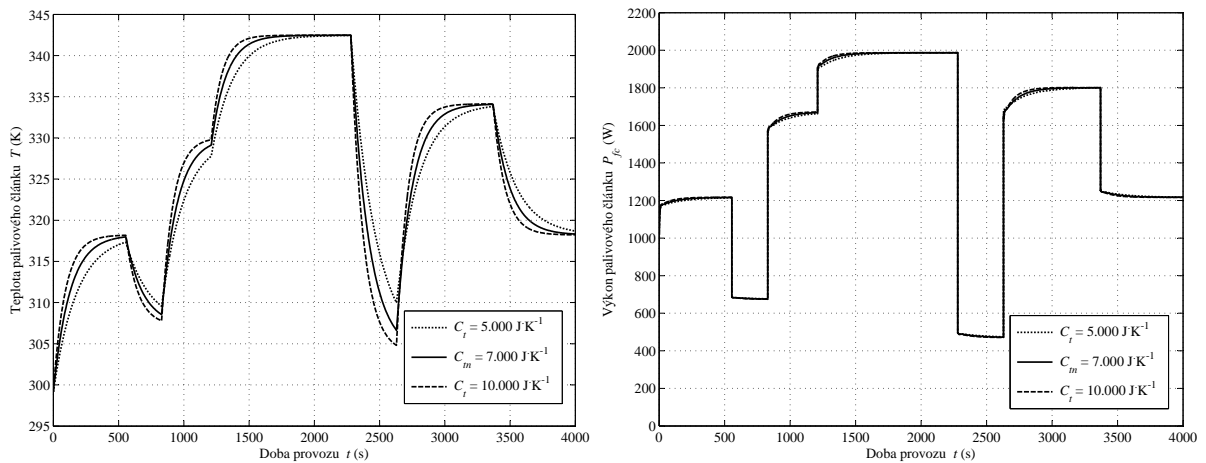
Provedené experimenty jsou zaměřeny hlavně na analýzu průběhu provozní teploty PEMFC při jeho případných konstrukčních modifikacích. Model PEMFC je rozšířen o model reforméru zemního plynu a je implementována regulace tlaků jednotlivých reaktantů  $p_x$ . Modely reforméru a regulace tlaku jsou navrženy v prostředí MATLAB®/Simulink a jsou uvedeny v disertační práci [6].

Jsou-li realizovány konstrukční či materiálové modifikace PEMFC, mají tyto změny přímý dopad na hodnoty výsledné tepelné kapacity  $C_t$  a tepelného odporu  $R_t$ , jež jsou zcela zásadní pro vývoj provozní teploty PEMFC a produkovaného tepla  $\dot{Q}$ . Amplitudy a doby trvání jednotlivých pulzů jsou na rozdíl od první části odlišné. Hodnoty amplitud jsou více rozmanité. Náhled na testovací zátěžný proud je na Obr. 6.4.



**Obr. 6.4:** Navržená sekvence pulzů a jejich amplitud představující zátěžný proud určený pro vyšetřování tepelných experimentů v rámci dynamického chování PEMFC

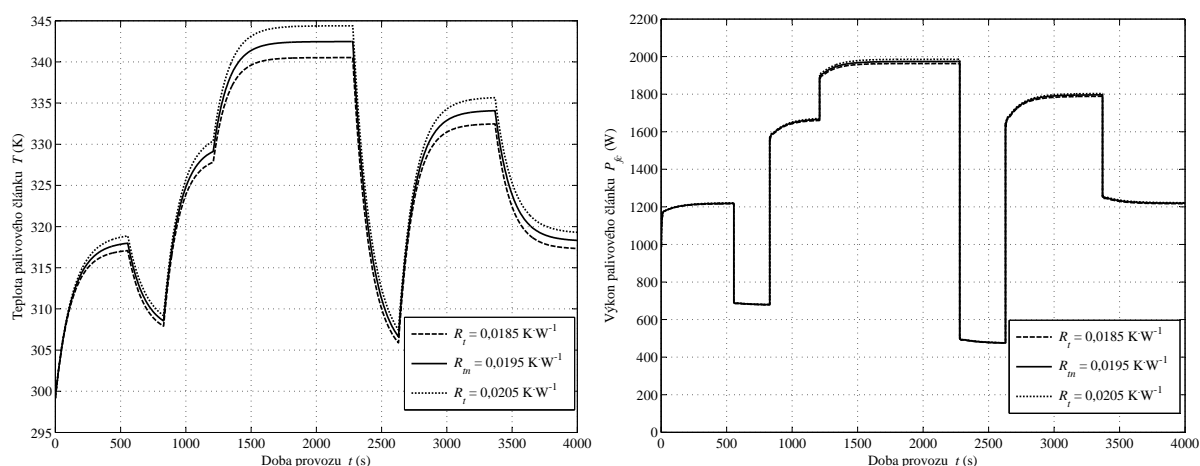
Následující Obr. 6.5 ukazuje porovnání provozních teplot PEMFC (vlevo) pro různé hodnoty tepelné kapacity, a tomu odpovídající průběhy výkonů (vpravo).



**Obr. 6.5:** Vliv změny tepelné kapacity  $C_t$  na průběh provozní teploty PEMFC (vlevo) a na průběh výkonu PEMFC (vpravo) pro tepelné kapacity:  $5.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $7.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$  nominální,  $10.000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$

Průběhy ukazují, že změna hodnoty tepelné kapacity nemá žádný vliv na hodnotu maximální dosažené teploty. Význam její změny je zejména v rychlosti nárůstu teploty na její nominální hodnotu. Při zvýšení tepelné kapacity dosáhne PEMFC nominálního výkonu rychleji, než při nominální kapacitě  $C_{tn}$ . PEMFC, který pracuje v rámci hybridního systému není obecně vhodný pro vykrývání náhlých výkonových špiček. Proto je lepší pohlížet na PEMFC více komplexně a hledat uplatnění i produkované tepelné energie. Vhodnější je implementovat PEMFC do hybridního systému, který zužitkovává i tepelnou energii, například ve spolupráci s kogenerační jednotkou.

Obecně při konstrukci PEMFC je podstatnější zaměřit se na ovlivnění hodnoty tepelného odporu  $R_t$ . Významnou úlohu má i samotné zpracování a volba možných materiálů. Následující Obr. 6.6 ukazuje porovnání teplot PEMFC (vlevo) pro různé hodnoty tepelného odporu, a tomu odpovídající průběhy výkonů (vpravo). Průběhy prezen-



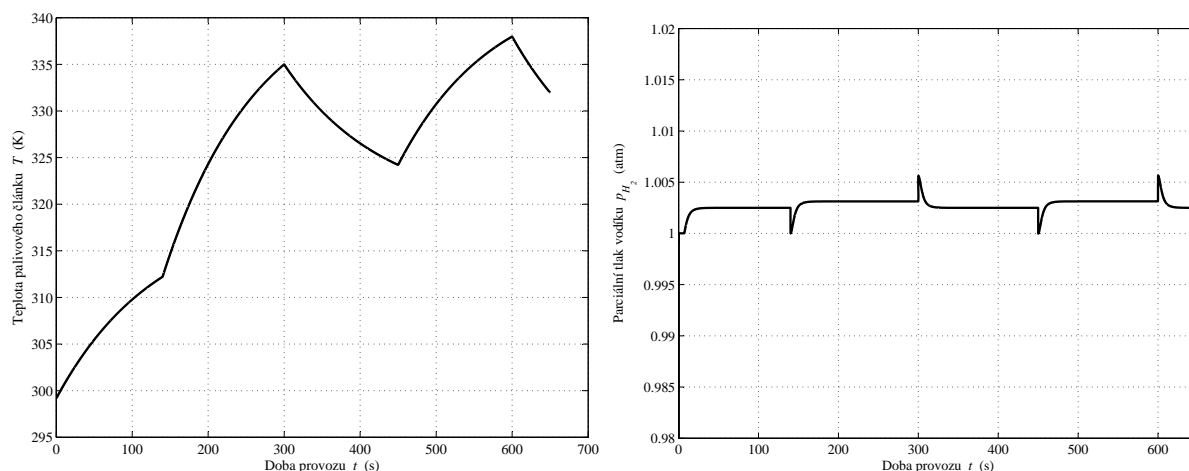
**Obr. 6.6:** Vliv změny tepelného odporu  $R_t$  na průběh provozní teploty PEMFC (vlevo) a na průběh výkonu PEMFC (vpravo) pro tepelné odpory: 0,0185 K·W<sup>-1</sup>, 0,0195 K·W<sup>-1</sup> nominální, 0,0205 K·W<sup>-1</sup>

tují skutečnost, že i malá změna tepelného odporu významně ovlivní provozní teplotu PEMFC. Změnou tepelného odporu lze dosáhnout výkonu, jenž je vyšší než nominální výkon. Výsledky specifikují důležité závislosti, které ovlivňují samotný návrh konstrukce a provedení PEMFC.

### 6.2.3 Model PEMFC, reformér, regulace a DC/DC konvertor - III. část

Ve třetí části analýzy již model PEMFC využívá modely reforméru a regulace tlaků. Tato konfigurace je ovšem doplněna o model snižujícího DC/DC konvertoru, který byl, stejně jako ostatní modely, vytvořen v MATLAB®/Simulink. Popis modelu snižujícího DC/DC konvertoru uvádí disertační práce [6].

První blok využívá sekvence zátěžných pulzů s celkovou dobou trvání 650 s a je zaměřena na vyšetření neelektrických parametrů. Velmi důležitá je i znalost vývoje parciálního tlaku a jeho případná regulace. Obr. 6.7 představuje vliv změny zátěže na parciální tlak vodíku (vlevo) a ukazuje vývoj provozní teploty PEMFC (vpravo). Tento

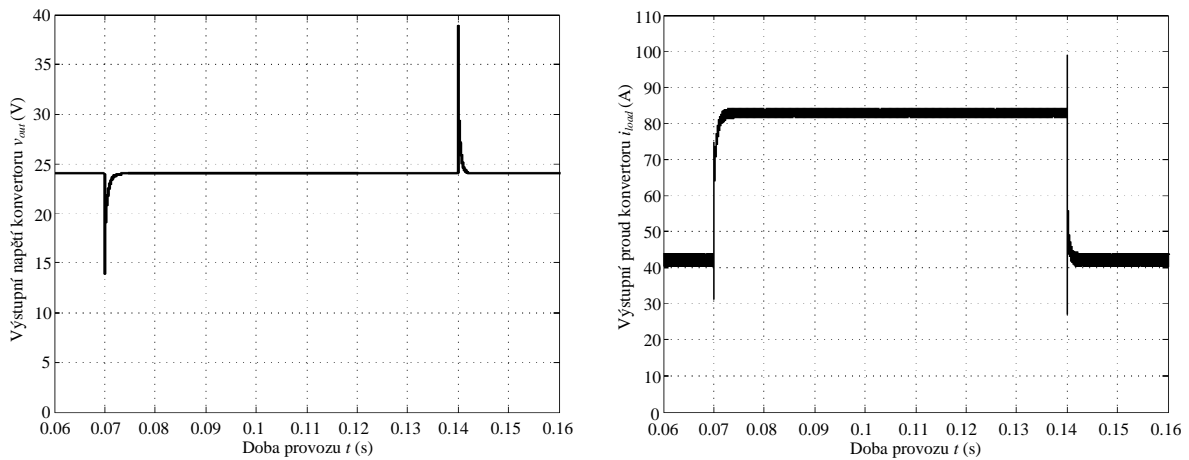


**Obr. 6.7:** Vývoj provozní teploty PEMFC (vlevo) a průběh parciálního tlaku vodíku (vpravo) pro navržený zátěžný proud



blok využívá sekvence zátěžných pulzů s celkovou dobou trvání 650 s. Charakter sekvence pulzů se volí takovým způsobem, aby obsahoval významnou skokovou změnu zátěžného proudu. Amplitudy pulzů odpovídající zatížení  $\frac{1}{2}I_{fc}$  začínají v časech 0 s, 300 s a 600 s a pulzy charakterizující plné zatížení jsou zahájeny v časech 140 s a 450 s. Sekvence tedy obsahuje dva velikostně stejné nárůsty a poklesy zatížení, jež mají téměř shodnou dobu trvání. Průběh na Obr. 6.7 (vlevo) ukazuje, že je tlak udržován kolem hodnoty 1,0 atm. Průběh teploty Obr. 6.7 (vpravo) demonstruje pouze skutečnost, že pro navrženou zátěž není dosaženo nominální provozní teploty.

Druhý blok experimentů se zaměřuje na analýzu výstupních elektrických parametrů snižujícího DC/DC konvertoru. Obr. 6.8 ukazuje výstupní napětí (vlevo) a proud konvertoru (vpravo).



**Obr. 6.8:** Průběh výstupního napětí (vlevo) a průběh výstupního proudu (vpravo) snižujícího DC/DC konvertoru

K vyšetřování elektrických parametrů na DC/DC konvertoru je využito sekvence, která obsahuje jeden velikostně stejný nárůst a pokles zatížení a která má celkovou dobu trvání 0,16 s. Na počátku sekvence využívá blok zatížení s amplitudou odpovídající  $\frac{1}{2}I_{fc}$ . V čase 0,07 s dochází ke zvýšení zátěžného proudu na jeho nominální hodnotu  $I_{fcn}$ , aby v čase 0,14 s mohlo dojít opět k odlehčení na  $\frac{1}{2}I_{fc}$ .

### 6.3 Resumé

Výsledky uvedené v této kapitole jsou prezentovány v disertační práci [2]. Práce rovněž seznamuje s principem palivového článku typu PEMFC a představuje jeho základní konstrukční provedení. Podrobně se zabývá problematikou matematického modelování PEMFC a přesně definuje provázanost jednotlivých veličin. Následně je navržen nový matematický model PEMFC vytvořený v MATLAB® a MATLAB®/Simulink, který umožňuje analýzu vývoje elektrických a neelektrických veličin PEMFC v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží a který byl společně s výsledky autorem publikován v [26]. V práci jsou dále představeny a okomentovány výsledky tepelných experimentů a dynamického chování PEMFC, které byly získány pomocí nového modelu rozšířeného navíc o reformér a DC/DC konvertor. Tato rozšíření jsou v kapitole rovněž popsána a jednotlivé výsledky byly autorem zveřejněny v [35] a v [36].

## 7 Fotovoltaický článek a jeho simulace

V kapitole jsou ukázány výsledky verifikace vytvořeného matematického modelu fotovoltaického modulu. Dále je na základě vytvořené aplikace provedena analýza výkonové disponibility fotovoltaického zdroje a je zhodnocena relevance veřejné databáze Fotovoltaický geografický informační systém (PVGIS).

### 7.1 Matematický model fotovoltaického modulu

Fotovoltaický modul je možné modelovat pomocí ekvivalentního elektrického obvodu, který se skládá ze zdroje proudu, diody a dvou rezistorů [37, 38]. Pomocí zdroje proudu je vyjádřen fotovoltaický proud  $I_{ph}$  generovaný dopadajícími fotony, pomocí diody je vyjádřen P-N přechod v propustném směru a rezistory představují vnitřní odpory článku jako celku. Model je vytvořen v MATLAB®/Simulink. Na rozdíl od ostatních publikací v sobě model spojuje upravený výpočet sériového a paralelního odporu přímo ze štítkových hodnot a současně respektuje i jejich teplotní závislost. Vytvořený model vychází z definicí vzájemných vztahů a z podrobného matematického popisu, který koresponduje s úvahou jednodiodového obvodu a který je uveden v disertační práci [2].

Pro stanovení velikosti odporů práce použila upravenou metodu výpočtu z [38]. Metoda vychází z předpokladu rovnosti maximálních výkonů fotovoltaického článku při STC, konkrétně výkonu vypočteného matematicky  $P_{max,m}$  a výkonu získaného přímo z údajů ze štítku  $P_{max}$ . Aplikace se vede takovým způsobem, aby byl nalezen právě jeden pár  $\{R_{sr}, R_{shr}\}$ , který splňuje podmínku rovnosti výkonů  $P_{max}$  a  $P_{max,m}$  a současně respektuje další parametry fotovoltaického modulu. Paralelní odpor lze vyjádřit následovně

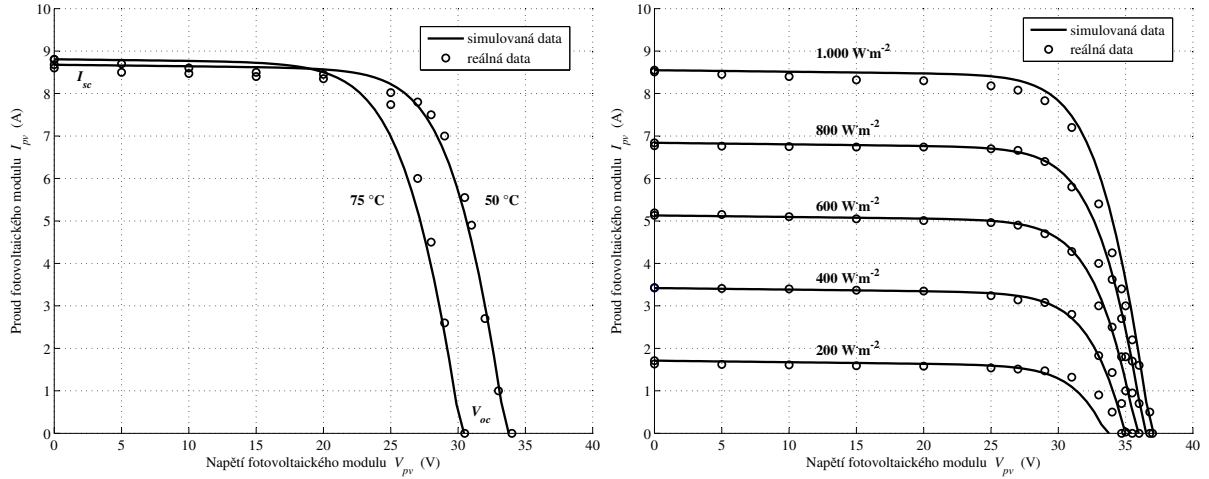
$$R_{shr} = \frac{V_{mp}(V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{sr})}{V_{mp} \cdot I_{ph} - V_{mp} \cdot I_0 \cdot \exp\left[\frac{(V_{mp} + I_{mp} \cdot R_{sr})}{N_s \cdot n} \cdot \frac{e}{k \cdot T}\right] + V_{mp} \cdot I_0 - P_{max}}, \quad (7.1)$$

kde  $R_{shr}$  je paralelní odpor fotovoltaického modulu při STC ( $\Omega$ ),  $V_{pm}$  je napětí fotovoltaického modulu při maximálním výkonu (V),  $I_{pm}$  je proud fotovoltaického modulu při maximálním výkonu (A),  $R_{sr}$  je sériový odpor fotovoltaického modulu při STC ( $\Omega$ ),  $I_{ph}$  je fotovoltaický proud (A),  $I_0$  je nominální saturační proud (A),  $N_s$  je počet článků spojených v sérii (-),  $n$  je faktor kvality diody,  $e$  je elektrický náboj (C),  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $J \cdot K^{-1}$ ),  $T$  absolutní teplota fotovoltaického modulu (K) a  $P_{max}$  je maximální výkon fotovoltaického modulu (W). Vzhledem k tomu, že metoda využívá iteračních metod, je konečné řešení odvislé od předem zvolené přesnosti výpočtu  $\epsilon_{er}$ .

#### 7.1.1 Verifikace fotovoltaického modelu

Verifikace vytvořeného modelu je realizována pro standardní testovací podmínky (STC) a dále pro různé intenzity slunečního záření a pro různé provozní teploty modulu. Vzájemné vazby a parametry jsou uvedeny v disertační práci [2]. Jmenovité hodnoty fotovoltaických modulů jsou měřeny při standardizovaných podmínkách. Součástí těchto podmínek je i konstantní teplota 25 °C. Problémem je, že u FVE nelze zajistit, aby jednotlivé moduly dosahovaly během provozu pouze této teploty. Reálná teplota modulu má přitom vliv na jeho elektrické vlastnosti a ovlivní i samotný průběh I-V charakteristiky, jakož i polohu jeho pracovního bodu [39]. Ve skutečnosti mohou povrchové teploty modulů dosahovat až přes 50 °C. Obecně je výkon vyráběný FVE během dne ovlivňován zejména změnou intenzity slunečního záření. Velikost intenzity slunečního záření, která dopadá na aktivní plochu fotovoltaických modulů, je závislá na několika

skutečnostech (úhel sklonu modulu, nadmořská výška, průchodnost atmosféry a jiné). Na druhou stranu samotná změna intenzity má významný vliv na elektrické parametry fotovoltaického modulu [39]. Následující Obr. 7.1 přináší porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro jeho různé provozní stavy. Grafické



**Obr. 7.1:** Porovnání I-V charakteristik reálného a simulovaného fotovoltaického modulu pro provozní teploty 50 °C a 75 °C při intenzitě slunečního záření  $1.000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (vlevo) a pro různé intenzity slunečního záření při provozní teplotě modulu 25 °C (vpravo)

výsledky na Obr. 7.1 verifikují matematický model z pohledu změny provozní teploty fotovoltaického modulu. Výsledky také potvrzují ověření modelu z pohledu změny intenzity slunečního záření, neboť proudy nakrátko se shodují a jednotlivé průběhy charakteristik spolu také korespondují. Maximální relativní chyba modelu byla zaznamenána pro krajní část charakteristiky při intenzitě ozáření  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , kdy se simulované napětí naprázdno lišilo o 1,31 %. Dále byly porovnány faktory plnění reálného a simulovaného fotovoltaického modulu při STC a při běžné provozní teplotě fotovoltaického modulu (NOCT). Účelem porovnání faktorů plnění však nebyla analýza kvality provedení fotovoltaického modulu, nýbrž snaha doplnit verifikaci matematického modelu. Hodnoty spolu téměř korespondují a relativní chyba dosahuje 0,5379 % pro STC a 0,0876 % pro NOCT.

## 7.2 Výkonová disponibilita a vhodnost veřejných databází

Výkonová disponibilita je analyzována na vzorku dat získaných během jednorového kontinuálního měření elektrických a neelektrických parametrů fotovoltaického článku (maximální výkon 100 W) instalovaného v lokalitě Brno (GPS 49° 11' 53" N; 16° 35' 32" E) v roce 2008. Měřená sestava je vybavena několika dalšími přístroji a měřicími čidly důležitých parametrů, které plně charakterizují provoz subsystému. Technická specifikace použitých přístrojů a zařízení je uvedena v [40]. V souvislosti s tím, je vytvořena aplikace v programu MATLAB®, jejíž koncept umožňuje pro libovolně vybrané časové období a požadovaný výkon zpracovat databázi reálně měřených dat a provést její analýzu. Analýzou změřených dat lze vyhodnotit například celkovou dobu, po kterou byl fotovoltaický modul schopen dodávat konkrétní hodnotu minimálního výkonu za vybrané období. Porovnání výkonové disponibility měsíců s nejnižším a nejvyšším množstvím vyrobené energie je v Tab. ?? [3], kde  $E_{month}$  představuje měsíční množství sluneční energie a  $t_{total,i}$  jednotlivé výrobní časy fotovoltaického modulu pro  $P_{pv} > 0$ ;  $P_{max}$ .

**Tab. 7.1:** Výkonový potenciál fotovoltaického modulu během června a prosince [3]

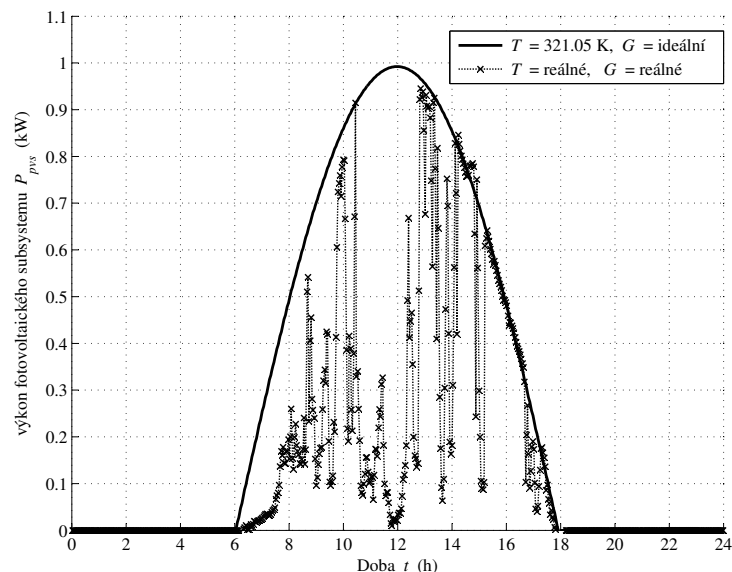
Období	$E_{month}$ (W·h)	$t_{total,20}$ (h)	$t_{total,40}$ (h)	$t_{total,60}$ (h)	$t_{total,70}$ (h)
Červen	10.316,88	180,87	117,62	47,32	9,85
Prosinec	1.272,85	22,88	12,8	0,12	0,00

Výsledky ukazují, že v prosinci je vyrobeno přibližně o 88 % méně elektrické energie než v červnu. Fotovoltaický modul je navíc v červnu provozován přes 47 hodin s výkonem větším než je  $0,6 \cdot P_{max}$ . Oproti tomu v prosinci pouze přibližně 0,1 hodiny. Velikosti výkonů opět ukazují na skutečnost, že optimální podmínky výroby v lokalitě umístění modulu jsou v letních měsících. Na základě měření jsou známy konkrétní závislosti chování fotovoltaického subsystému, které jsou jedinečné pro místo, kde je systém umístěn.

Pro získání vstupních atmosférických hodnot lze využít i veřejně dostupných databází, které obsahují informace o rozložení intenzity slunečního záření a vývoji teploty pro zvolenou lokalitu během roku. V návaznosti na vyhodnocení výkonové dostupnosti je provedeno zhodnocení relevance využití takovéto databáze. Konkrétně je hodnocena databáze PVGIS. Měřená lokalita Brno v rámci České republiky vykazuje jedny z nejvyšších hodnot intenzit slunečního záření [41]. Relevance je ověřována konfrontací údajů z veřejné databáze s reálně měřenými daty. Změřená data intenzit slunečního záření jsou vytvořenou aplikací v MATLAB<sup>®</sup> přepočítávána na množství sluneční energie. Podle PVGIS [42] se pro zvolenou analyzovanou lokalitu Brno, při uvažování nadmořské výšky 245 m n. m. a při zvoleném úhlu natočení 60°, pohybuje roční množství sluneční energie v rozmezí od 1.050 kWh·m<sup>-2</sup> do 1.100 kWh·m<sup>-2</sup>. Roční množství sluneční energie vypočtené z reálně měřených dat je 1.082,57 kWh·m<sup>-2</sup>. Tato hodnota se pohybuje ve výše uvedeném rozmezí dle PVGIS. Roční množství energie představuje cennou informaci spíše v souvislosti s potenciálním finančním výnosem. Znalost této hodnoty je také dobrá pro základní představu dimenzování hybridního systému. Je provedena také konfrontace reálných a teoretických průměrných denních množství sluneční energie pro jednotlivé měsíce. Porovnání naměřených hodnot s hodnotami v databázi ukazuje, že jsou téměř identické a rozdíly jsou minimální. Z tohoto pohledu se PVGIS jeví jako relativně vhodný.

### 7.2.1 Simulace fotovoltaického subsystému

V návaznosti na vytvořený matematický model je analyzován fotovoltaický subsystém. Simulace je založená na reálných vstupních datech a pro názornost je porovnána i s provozem, který využívá vstupní data odpovídající ideálním podmínkám. Pro simulaci je využito změřených dat s intenzitami slunečního záření a s provozními teplotami fotovoltaického modulu. Výsledky ukazuje Obr. 7.2. Matematická simulace je uskutečněna pro časový rámec jednodenního provozu subsystému. Výsledky opět demonstrují přímou závislost výkonu fotovoltaického subsystému  $P_{pvs}$  na intenzitě slunečního záření během dne. Konkrétně lze sledovat náhlé a rychlé změny výkonu subsystému. Maximální modelovaná změna výkonu vznikla během tříminutového intervalu, konkrétně v době od 10 h 25 min do 10 h 27 min, kdy došlo k poklesu 60,96 % (vztaženo k nominálnímu výkonu subsystému  $P_{pvsn}$ ). V případě, že fotovoltaický subsystém představuje jednu z částí hybridního systému, musí být na základě řídicího algoritmu pokles výkonu kompenzován ostatními kooperujícími subsystémy, aby byla zajištěna kontinuální a nepřerušovaná



**Obr. 7.2:** Porovnání výkonů fotovoltaického subsystému složeného ze čtyř modulů ( $N_{par}=2$  a  $N_{ser}=2$ ) pro ideální a reálné atmosférické podmínky pro lokalitu Brno

dodávka energie pro aktuálně připojenou zátěž. Tím je demonstrována hlavní přednost tvořených modelů subsystému, které mohou posloužit pro efektivní návrh hybridního systému, kdy lze vyhodnocovat odlišné provozní stavy, založené nejen na změně atmosférických podmínek.

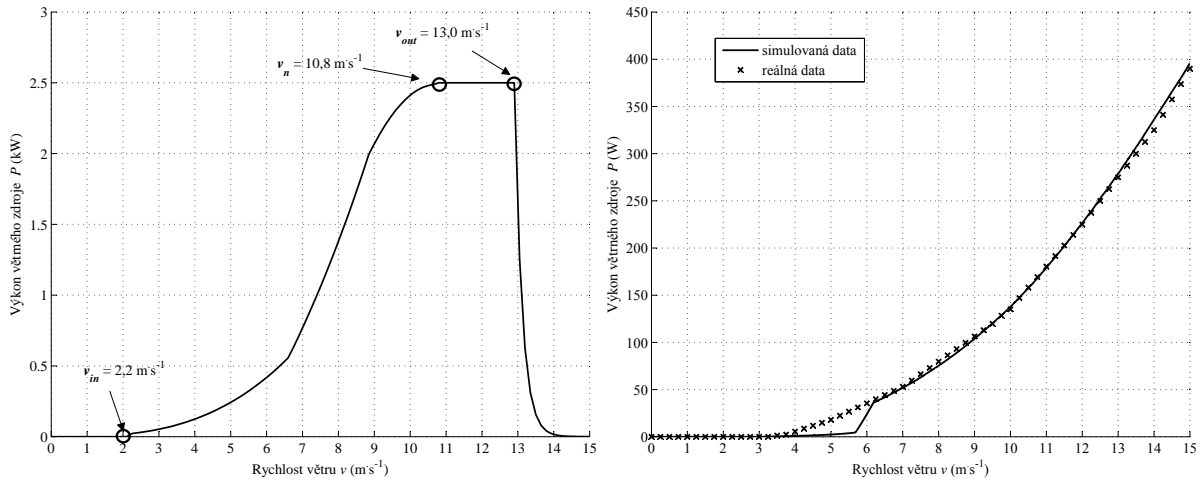
### 7.3 Resumé

Problematika představená v této kapitole je podrobně uvedena v disertační práci [2]. V práci je popsán princip fotovoltaického článku a přináší základní údaje o této technologii. Dále se zabývá problematikou matematického modelování fotovoltaického modulu a konkretizuje potřebné vstupní parametry a jejich vzájemné vazby. V návaznosti na to je představen vytvořený matematický model fotovoltaického modulu a je provedena jeho verifikace. Následuje diskuze nad výsledky provedených experimentů, při kterých je využita i vhodná implementace reálných hydrometeorologických dat. Popis modelu a jeho verifikace autor prezentuje v [12]. Práce také přibližuje dlouhodobé kontinuální měření statického fotovoltaického referenčního modulu. Rovněž prezentuje výsledky provedené analýzy, která směřovala k ověření vhodnosti užití veřejných databází slunečního záření a teplot, jakožto zdroje vstupních veličin pro matematický model. Výsledky analýzy posloužily pro zhodnocení samotné výkonové disponibility fotovoltaického zdroje pro jednotlivé měsíce v dané lokalitě. Výsledky analýzy byly autorem publikovány konkrétně v [3] a v [41].

## 8 Větrný zdroj energie a jeho simulace

V kapitole jsou představeny výsledky dvou vytvořených modelů větrných zdrojů energie, na kterých jsou demonstrovány možné přístupy matematického modelování. Uvažované předpoklady, matematické závislosti a vyčíslené hodnoty konkrétních použitých veličin jsou uvedeny přímo v disertační práci [2].

V prostředí MATLAB® je vytvořen základní popis větrného subsystému představující malou větrnou elektrárnu, která využívá turbínu s horizontální osou otáčení. Jmenovitý elektrický výkon elektrárny je 2,5 kW a elektrárna pracuje s generátorem s neodym permanentními magnety (NdFeB). Rotor turbíny má lopatky s průměrem 3,6 m. Vytvořený teoretický model tedy využívá přístupu popsáno v [18]. Průběh výkonu větrné elektrárny je na následujícím Obr. 8.1 (vlevo). Další matematický model představuje zjednodušený matematický model malé větrné elektrárny se Savoniovým-Darrieovým rotorem vytvořeným v prostředí MATLAB®/Simulink. Matematický model popisuje větrnou elektrárnu s výkonem 300 W s typovým označením DC-300, který využívá pomaluběžný synchronní generátor s permanentními NdFeB magnety. Pro simulaci generátoru je využito bloku *Permanent magnet synchronous machine* z knihovny *SimPowerSystem* programu MATLAB textsuperscript®/Simulink a porovnání výkonových charakteristik reálné a simulované větrné elektrárny ukazuje Obr. 8.1 (vpravo).



**Obr. 8.1:** Výkonová křivka větrného zdroje energie (vlevo) a porovnání výkonových charakteristik reálné a simulované větrné elektrárny (vpravo)

Z Obr. 8.1 (vlevo) lze vidět, že výkonová křivka turbíny je nelineární a že větrný zdroj energie začíná vyrábět elektrický výkon až při rychlostech nad 2,2 m·s<sup>-1</sup>. Optimální provoz (s jmenovitým výkonem) nastává při rychlosti 10,8 m·s<sup>-1</sup>. Pro rozmezí od 10,8 m·s<sup>-1</sup> do 13,0 m·s<sup>-1</sup> má větrný zdroj potenciál vyrábět vyšší výkon. Díky regulaci natočení rotoru se však jeho výkon udržuje na jmenovité hodnotě. Pokud je dosaženo rychlostí nad 13,0 m·s<sup>-1</sup>, které jsou již nad rámec možností regulace, dochází z důvodu nebezpečně vysokých otáček k odstavení elektrárny. Toto odstavení představuje v charakteristice poměrně strmý propad výkonu. Z porovnání na Obr. 8.1 (vpravo) je patrná chybovost matematického modelu v nižších otáčkách. V oblasti nad 6 m·s<sup>-1</sup> se dosahuje relativní chyby kolem 3 %. Při simulaci je součinitel výkonu hybridní větrné elektrárny stanoven podle metody a empirického vyjádření uvedených v [43]. U simulované hybridní větrné elektrárny se nebere v úvahu změna úhlu natočení lopatek, proto ji neuvažuje ani součinitel výkonu.

## 8.1 Resumé

Výsledky uvedené v této kapitole jsou prezentovány v disertační práci [2]. Práce dále popisuje princip větrného zdroje energie a přináší základní údaje o této technologii.

Věnuje se matematickému popisu nízkovýkonového větrného zdroje, přičemž konkretizuje potřebné vstupní parametry a jejich vzájemné vazby. Dále představuje kompletní výsledky dvou modelů větrných zdrojů energie, na kterých jsou demonstrovány možné přístupy matematického modelování. Výsledky jednoho z přístupů byly autorem prezentovány v [1]. Druhý přístup vznikl ve spolupráci autora a studenta při tvorbě diplomové práce [44].

## 9 Závěr

V závěru práce je deklarováno splnění stanovených cílů. Následně je proveden souhrn nových poznatků a je představen vlastní přínos. Práce dále ukazuje na praktické využití jednotlivých výstupů a předkládá návrh následných vědeckých prací.

### 9.1 Splnění jednotlivých cílů práce

Naplnění konkrétních cílů je deklarováno následujícím popisem.

#### Specifikace nedostatků současných systémů a modelů

V práci byly identifikovány hlavní zákonitosti, závislosti a vazby, které vedly ke správnému modelování PEMFC a hybridního systému jako celku. Charakteristika palivových článků byla autorem představena v knize [5]. Na základě přehledu provozovaných nebo modelovaných konceptů hybridních systémů v energetice byla provedena specifikace hlavních nedostatků modelů PEMFC. Specifikace vedla k vytvoření nového zdokonaleného dynamického modelu palivového článku. Uvedená problematika byla autorem publikována v [1].

#### Návrh a tvorba nového modelu PEMFC

Nedostatkem současných modelů bylo zavádění zjednodušujících předpokladů, přičemž některé dynamicky se vyvíjející veličiny byly považovány za konstantní a některé závislosti nebyly uvažovány vůbec. V programu MATLAB® a v MATLAB®/Simulink byl vytvořen nový matematický model palivového článku. Vytvořený model eliminoval hlavní nedostatky současných verifikovaných modelů a umožnil vyšetřování jednak ustálených stavů PEMFC, ale hlavně dynamického chování jeho elektrických a neelektrických veličin, a to v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Tvorba nového modelu palivového článku byla autorem postupně představena v několika na sebe navazujících publikacích. Prvotní návrh byl publikován v [26]. Model byl dále doplněn o modely reforméru a DC/DC konvertoru. V návaznosti na to byla v [35] představena implementace modelu reforméru. Popis modelu DC/DC konvertoru byl autorem popsán v [36].

#### Analýza provozních stavů PEMFC

Na vytvořeném modelu PEMFC proběhla analýza různých ustálených provozních stavů článku. Byly realizovány experimenty, které vedly k vyšetření dynamických změn napětí, výkonu a teploty článku pro dlouhodobý simulační scénář a které autor prezentoval v [26]. Model PEMFC rozšířený o model reforméru byl podroben tepelným experimentům ukazující vliv změny tepelné kapacity a tepelného odporu článku na jeho provozní teplotu a výstupní výkon. Výsledky tepelných experimentů byly představeny v [35]. Další provedené experimenty analyzovaly elektrické poměry na DC/DC konvertoru a byly autorem uvedeny v [36].

## Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu

V práci byl proveden matematický popis fotovoltaického modulu využívající pro parametrizaci výhradně štitkové hodnoty. Provedený popis umožňoval implementaci iteračního výpočtu odporů a respektoval jejich teplotní závislost. Na základě tohoto popisu byl v programu MATLAB® vytvořen samotný fotovoltaický model. Návrh komplexního modelu fotovoltaického modulu byl autorem objasněn v [1, 12].

## Analýza navrženého fotovoltaického modulu

Vytvořený model fotovoltaického modulu byl podroben analýze, která potvrdila jeho verifikaci. Byla provedena simulace fotovoltaického subsystému, ve kterém byly jako vstupní veličiny použity štitkové hodnoty jednotlivých fotovoltaických modulů, ale také dlouhodobě měřená hydrometeorologická data. Výsledky potvrzující verifikaci modelu a ukazující simulace fotovoltaického subsystému autor prezentoval v [12].

## Analýza výkonové disponibility fotovoltaického zdroje a ověření vhodnosti veřejné databáze

Pro ověření disponibility fotovoltaického zdroje byla vytvořena aplikace v programu MATLAB®, která umožnila zpracovat a vyhodnotit data získaná z kontinuálního dlouhodobého měření referenčního fotovoltaického modulu. Dosažené výsledky byly autorem představeny v [3]. Aplikace umožnila porovnat hodnoty slunečního záření dopadajícího na referenční modul s hodnotami množství sluneční energie obsaženými ve veřejné databázi. Na základě porovnání byla ověřena vhodnost využití těchto databází pro návrh fotovoltaických zdrojů. Závěry z provedené konfrontace byly autorem publikovány v [41].

## Model větrného zdroje energie

V rámci práce byl popsán a simulován zjednodušený model větrného zdroje energie a byly nastíněny možnosti dalšího zdokonalení a rozšíření modelu. Model větrného zdroje byl autorem představen v [1].

Na základě výše uvedených skutečností lze konstatovat, že stanovené cíle disertační práce byly splněny.

## 9.2 Souhrn nových poznatků a vlastní přínos

Přínos práce je v provedeném vývoji a vzniku nového matematického modelu nízkoteplotního palivového článku typu PEMFC, který byl vytvořen v MATLAB® a MATLAB®/Simulink a který umožňuje vyšetřování dynamického chování PEMFC v rámci scénáře s dlouhodobou zátěží. Na základě zhodnocení současného stavu problematiky PEMFC představuje vyvinutý model komplexní simulační nástroj, který odstraňuje některé zjednodušující předpoklady publikovaných modelů a zároveň uvažuje i dynamické chování řady neelektrických parametrů článku. Vyvinutý model vychází z částečných řešení již verifikovaných modelů a respektuje vedle změn aktivačních ztrát, ohmických ztrát, koncentračních ztrát, vnitřního odporu či parciálních tlaků reaktantů, také samotnou změnu provozní teploty článku.

Dílním přínosem práce je samotná identifikace nedostatků současných matematických modelů palivových článků. Vyvinutý model článku ovšem neeliminuje všechny specifikované nedostatky. Provedená identifikace nedostatků proto může přispět k dalšímu zdokonalení vyvinutého modelu, a to vždy podle požadavků a účelu uvažovaných simulací. Za dílní přínos práce může být také považovaná implementace modelu snižujícího



DC/DC konvertoru, který zvyšuje praktickou aplikovatelnost modelu v rámci hodnocení hybridního systému jako celku.

Přínosem je fakt, že paralelně s vyšetřováním vývoje teploty palivového článku je respektována skutečnost použití reforméru. Odborné publikace [45, 46], podle kterých byl model reforméru vytvořen, předpokládaly v simulacích konstantní teplotu článku. V případě využití PEMFC ke spolupráci s kogenerační jednotkou je znalost průběhu teploty článku nesmírně důležitým parametrem. Práce deklaruje, že konstrukční a materiálové modifikace palivového článku mají zcela zásadní dopad na vývoj provozní teploty článku a stanovení množství produkovaného tepla, jelikož přímo ovlivňují hodnoty výsledné tepelné kapacity a tepelného odporu. U analyzovaného článku byla při téměř 5% změně tepelného odporu zaznamenána změna teploty přibližně 1,8 K, což by u článku s nominálním výkonem necelých 2,0 kW představovalo změnu jeho nominálního výkonu o jednotky W. Při zvýšení tepelné kapacity o více jak 40 % bylo nominálního výkonu dosaženo rychleji a maximální změna výkonu ve zkoumaném časovém intervalu byla přibližně 10 W.

Přínos je možné shledat ve vytvoření matematického modelu fotovoltaického modulu v prostředí MATLAB® a MATLAB®/Simulink. Současné publikace často hodnoty sériového a paralelního odporu fotovoltaické modulu zanedbávají, stanovují experimentálně nebo považují za konstantní. Vytvořený model respektuje vliv teploty na hodnoty jednotlivých elektrických parametrů a využívá zdokonalené determinace sériového a paralelního odporu pomocí iteračního výpočtu vycházejícího pouze ze štítkových hodnot modulu.

Důležitá je i aplikace vytvořená v programu MATLAB®, která slouží pro zpracování dlouhodobě měřených dat. Aplikace pro zvolené časového období a požadovaný výkon zpracovává databázi reálně měřených dat a provádí jejich analýzu. Aplikace je schopna například vyhodnotit celkovou dobu, po kterou byl fotovoltaický modul schopen dodávat konkrétní hodnotu minimálního výkonu za vybrané období. Výsledky v Tab. 7.1 [3] například ukazují, že fotovoltaický modul je v červnu provozován přes 47 hodin s výkonem větším než je  $0,6 \cdot P_{max}$ , oproti tomu v prosinci pouze přibližně 0,1 hodiny. Jedná se svým způsobem o jednoduchou aplikaci, která však poskytuje důležité informace pro vyhodnocení výkonové dostupnosti fotovoltaického zdroje energie.

Práce také obsahuje poznatky plynoucí z provedení hodnocení relevance využití veřejné databáze PVGIS, jakožto technického podpůrného prostředku pro prvotní návrh FVE. Jelikož PVGIS představuje interaktivní mapu, která čerpá z dat získaných v období od 1981 až 1990 a má obecně přispět k navýšení podílu OZE v celkovém portfoliu výroben, popřípadě má pomoci objektivnímu hodnocení jednotlivých finančních rámců právě do FVE, bylo vhodné ji porovnat s reálně měřenými daty. Výsledky porovnání ukazují, že jsou data téměř identická a rozdíly jsou minimální.

### 9.3 Praktické využití

Obecně platí, že všechny v práci vytvořené matematické modely představující jednotlivé zdroje energie lze využít pro simulace hybridního systému s PEMFC a OZE.

Palivový článek typu PEMFC, který pracuje v rámci hybridního systému, není vhodný pro vykrývání náhlých výkonových špiček. Na PEMFC je nutné pohlížet více komplexně a hledat uplatnění i produkované tepelné energie. V případě využití PEMFC ke spolupráci s kogenerační jednotkou umožňuje model PEMFC vyšetřit provozní teplotu článku pro různé stavy zatížení. Výstupy simulací poskytují znalost průběhu teploty

člátku, jež představuje nesmírně důležitý parametr. Implementace modelu reforméru je vhodná pro získání představy o spotřebě zemního plynu.

Práce obsahuje verifikovaný matematický popis fotovoltaiického modulu, který detailně přibližuje princip funkce modulu, ale také uvádí jednotlivé fyzikální závislosti a uvažované algoritmy, jež by bylo možné využít i v jiných simulačních prostředích. Prostřednictvím programovacího jazyka Fortran lze uplatnit detailní popis k implementaci do programu PSCAD, který v současné době u fotovoltaiického modulu neuvažuje zdokonalený výpočet jeho jednotlivých odporů přímo ze štítkových hodnot a nerespektuje teplotní závislost odporů a napětí modulu.

Vytvořený model fotovoltaiického modulu je podroben úspěšné verifikaci, což vede k možnosti jeho praktického využití v rámci simulací celého hybridního systému. Vedle toho byl model využit i jako podpůrný prostředek při vzniku funkčního vzorku laboratorního měřicího setu pro analýzu nízkovýkonových fotovoltaiických modulů. Verifikace tohoto měřicího setu byla realizována na základě vytvořeného matematického modelu. Podrobnější informace o měřicím setu jsou uvedeny v [47], kde jsou rovněž představeny provedené experimenty. Doplnující informace jsou zaznamenány v [48].

Kombinace informací o výkonové dostupnosti a PVGIS přispěje k dosažení komplexní představy, jak správně nadimenzovat a řídit hybridní systém obsahující FVE. Vytvořená aplikace řešící dostupnost zdroje energie poslouží k lepšímu nastavení jednotlivých procesů řídicího algoritmu daného hybridního systému.

## 9.4 Návrh dalšího řešení

Práce identifikovala jednotlivé nedostatky současných matematických modelů PEMFC. Vyvinutý model PEMFC ovšem neeliminuje všechny nedostatky. Navazující výzkumné práce by se proto měly zabývat jejich další redukcí, ve formě jejich postupné implementace do modelu PEMFC nebo do modelu hybridního systému. Eliminace konkrétního nedostatku musí být realizována po zvážení jeho relevantnosti ve vazbě na prováděné simulace a experimenty. Vzhledem k technickým a ekonomickým aspektům by bylo potřebné zaměřit se na prodloužení životnosti palivového článku, a to například formou nového řídicího algoritmu hybridního systému.

Další výzkumné práce by se mohly zabývat konkrétní podobou modelu hybridního systému. Ten by implementoval modely subsystémů představující jednotlivé typy energetických zdrojů a další potřebná zařízení. Samotné vytvoření dynamického modelu hybridního systému je velmi složitá a široká problematika, jelikož se musí respektovat řada vzájemných vazeb hned mezi několika obory. Je proto nutné detailně zhodnotit vývoj současných řídicích algoritmů. Vhodné je rovněž navrhnout a vytvořit zcela nový řídicí algoritmus hybridního systému. Hlavním rozhodovacím kritériem současných řídicích algoritmů je stav nabití baterií. Nový algoritmus by ze stavu nabití baterií vycházel nemusel. Dalším úkolem je také navrhnout a vytvořit modelové scénáře (změny atmosférických podmínek, výpadky, degradace), aby bylo možné spolehlivost algoritmu otestovat, modifikovat či ověřit jeho oprávněnost. Hlavní důraz u nového algoritmu by měl být přitom kladen na optimalizovaný provoz palivového článku, případně i elektrolyzéru.

Hybridní systém by mohl být také doplněn o modely subsystémů, které představují například malou vodní elektrárnu, akumulární zařízení nebo střídač. Přínosné by bylo i zdokonalení modelu větrného zdroje energie. Navazující výzkumné práce by měly obecně vést ke zdokonalování v práci provedených a modelovaných partiálních řešení. Případně jednotlivá řešení postupně implementovat i do dalších simulačních prostředí.

## Použitá literatura

- [1] Ptacek, M. The definition of input parameters for modelling of energetic subsystems. *EPJ Web of Conferences*, vol. 54, pp. 02002.1–02002.8, June 2013, ISSN 2100-014X.
- [2] Ptáček, M. *Parciální řešení hybridního systému s nízkoteplotními palivovými články a OZE*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [3] Ptáček, M., Novotný, J., Matoušek, A. Analýza fotovoltaické části multienergetického grid-off systému s palivovým článkem. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2010*. Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, s. 1–5, ISBN 978-80-89402-24-3.
- [4] Carter, D., Wing, J. The Fuel Cell Industry Review 2013. Fuel Cell Today. [online]. [cit. 20.6.2014]. 20 pp. Dostupné na: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/industry-review>
- [5] Mastný, P., Drápela, J., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Mišák, S. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Ročník č.1. Praha, Česká republika: České vysoké učení technické v Praze, Prosinec 2011, ISBN 978-80-01-04937-2, 256 s.
- [6] Ptacek, M., Pavelka, T., Novotny, J. The cooperation of fuel cells and renewable energy sources: A short review of operated energetics systems and their main deficiencies of pemfc models in hybrid systems. In *Electric Power Engineering (EPE), Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on*, vol. 1., Brno, Czech Republic, May 2014, pp. 363–366, ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [7] Deshmukh, M., Deshmukh, S. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, 2008. pp. 235 – 249, ISSN 1364-0321.
- [8] Sharaf, A., Ozkop, E., Altas, I. A Hybrid Photovoltaic PV Array-Battery Powered EV-PMDrive Scheme. In *Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada*, 2007, pp. 37–43, ISBN 978-1-4244-1444-4.
- [9] Schoenung, S., del Pilar Argumosa, M. Comparison of Stationary Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Systems. [cit. 31.8.2012]. 20 p. Dostupné na: [www.fuelcellseminar.com/media/5076/dem33-3\\_schoenug.pdf](http://www.fuelcellseminar.com/media/5076/dem33-3_schoenug.pdf).
- [10] Hansen, A. D., Sørensen, P., Hansen, L. H., Bindner, H. *Models for a Stand-Alone PV System*. Risø National Laboratory, Roskilde, Tech. Rep. Risø-R-1219 (EN)/SEC-R-12, December 2000, 78 p. Dostupné na: [http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:91233/datastreams/file\\_7727175/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:91233/datastreams/file_7727175/content).
- [11] Iqbal, M. Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, vol. 28, no. 2, 2003, pp. 223 – 237, ISSN 0960-1481.
- [12] Ptacek, M., Matousek, A. Modelling of Photovoltaic Array for Hybrid System. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011*, vol. 1. Ostrava, Czech Republic: VSB - Technical University of Ostrava, May 2011, pp. 1–4, ISBN 978-80-248-2393-5.
- [13] Cetin, E., Yilanci, A., Ozturk, H. K., Colak, M., Kasikci, I., Iplikci, S. A micro-DC power distribution system for a residential application energized by photovoltaic-wind/fuel cell hybrid energy systems. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 8, 2010, pp. 1344 – 1352, ISSN 0378-7788.
- [14] Choe, G. Y., Kim, J. S., Kang, H. S., Lee, B. K., Lee, W. Y. Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) modeling for high efficiency fuel cell balance of plant (BOP). In *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), October 2007, pp. 271–276.

- [15] Petrínek, K., Cirstea, M. Holistic Modelling of a Fuel Cell Power System and FPGA Controller using Handel-C. In *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, November 2006, pp. 4951–4954, ISSN 1553-572X.
- [16] Correa, J., Farret, F., Popov, V., Simoes, M. Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 1, March 2005, pp. 211–218, ISSN 0885-8969.
- [17] Haubrock, J., Heideck, G., Styczynski, Z. Dynamic Investigation on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, June 2007, pp. 1–6, ISSN 1932-5517.
- [18] Khan, M., Iqbal, M. Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, vol. 30, no. 3, 2005, pp. 421–439, ISSN 0960-1481.
- [19] Jia, J., Yang, S., Wang, Y., Cham, Y. Matlab/Simulink based-study on PEM fuel cell and nonlinear control. In *Control and Automation, 2009. ICCA 2009. IEEE International Conference on*, December 2009, pp. 1657–1662.
- [20] Onar, O., Uzunoglu, M., Alam, M. Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system. *Journal of Power Sources*, vol. 161, no. 1, 2006, pp. 707 – 722, ISSN 0378-7753.
- [21] Blažek, J., Rábl, V. *Základy zpracování a využití ropy*, Druhé vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, ISSN 80-7080-619-2, 107 s.
- [22] Petroleum.cz. Výroba vodíku parním reformováním. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>.
- [23] HyFLEET. On-site steam Reforming. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/Technology/HydrogenProduction/reforming>.
- [24] Somolová, M., Dlouhý, P. Hytep.cz - výroba vodíku. [online]. [cit. 31.8.2014]. Dostupné na: <http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/491-vyroba-vodiku>.
- [25] Lee, S. H., Applegate, D. V., Ahmed, S., Calderone, S. G., Harvey, T. L. Hydrogen from natural gas: part I - autothermal reforming in an integrated fuel processor. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 8, 2005, pp. 829 – 842, ISSN 0360-3199.
- [26] Ptáček, M., Matoušek, A. New Dynamic Model of Low-Temperature Fuel Cell Stack and the Micro-Cogeneration Systems. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 491–497, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [27] Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A., Jensen, H. M., Peppley, B. A., Roberge, P. R. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1-2, 2000, pp. 173 – 180, ISSN 0378-7753.
- [28] Papadopoulos, P., Marinopoulos, A., Papagiannis, G. Dynamic modelling of a grid-connected pem fuel cell in a distributed generation network. in *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), June 2009, pp. 1–8.
- [29] Horák, B., Koziolek, J., Kopřiva, M., Papoušek, M., Slanina, Z. *Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem*, Říjen 2005.
- [30] Colleen, S. *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, 1st ed., May 2008, ISBN 978-0-12-374259-9, 456 p.
- [31] Barath, P. *Palivové články H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> s anexovou a bipolární membránou*. Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Červen 2008.

- [32] Padullés, J., Ault, G., McDonald, J. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1 - 2, 2000, pp. 495 – 500, ISSN 0378-7753.
- [33] Wang, C. *Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems*. Ph.D. dissertation, Montana State University, July 2006.
- [34] Georgakis, D., Papathanassiou, S., Manias, S. Modeling and Control of a Small Scale Grid-connected PEM Fuel Cell System. In *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, June 2005, pp. 1614–1620.
- [35] Ptacek, M., Mastny, P. The Investigation of Thermal Behaviour of the Low-Temperature Fuel Cell Stack by the Supplemented Dynamic Model. In *Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development*. Paris, France: WSEAS Press, December 2012. pp. 160–165, ISBN 978-1-61804-139-5.
- [36] Ptacek, M., Matousek, A., The Implementation of the Dynamic Experiments of the Low-temperature Fuel Cell Stack with the Buck DC/DC Converter. In *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013*. Stará Lesná, Slovakia: Technical University of Košice, September 2013, pp. 200–203, ISBN 978-80-553-1441-9
- [37] Yu, T. C., Chien, T. S. Analysis and simulation of characteristics and maximum power point tracking for photovoltaic systems. In *Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on*, November 2009, pp. 1339–1344.
- [38] Villalva, M., Gazoli, J., Filho, E. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 5, May 2009, pp. 1198–1208, ISSN 0885-8993.
- [39] Ptáček, M. Návodů laboratorních úloh pro výuku vodíkových a fotovoltaičských technologií. [online]. ÚEEN, FEKT, VUT v Brně. [cit. 29.6.2014]. Dostupné na: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/index.php/h2-a-five-menu-ke-stazeni>.
- [40] Ústav elektroenergetiky. VUT v Brně. Laboratoř nekonvenčních přeměn. [online]. [cit. 20.8.2014]. Dostupné na: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/laboratory-of-unconventional-energy-conversion/index.php>.
- [41] Ptacek, M., Khisamutdinov, N. Comparison of Amount of Solar Energy of the Photovoltaic Panel in the Given Area. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Tomsk, Russia: TPU Press, April 2010, pp. 14–16, ISBN 0-7803-8226-9
- [42] European Commission, J. R. C. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. [online]. Institute for Environment and Sustainability Renewable Energies Unit. [cit. 20.4.2011]. Dostupné na: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- [43] Bianchi, N., Bolognani, S., Fornasiero, E., Morandin, M., Pavesi, G. Optimal drive and machine sizing for a self starting, vertical axis, low power wind generator. In *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International*, September 2012, pp. 178–183.
- [44] Hořava, P. *Simulace malé větrné elektrárny se Savoniovým-Darrieovým rotorem*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 51 s.
- [45] Uzunoglu, M., Alam, M. Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3, September 2006, pp. 767–775, ISSN 0885-8969

- [46] El-Sharkh, M., Rahman, A., Alam, M., Sakla, A., Byrne, P., Thomas, T. Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant. *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, November 2004. pp. 2022–2028, ISSN 0885-8950.
- [47] Ptacek, M., Pavelka, T., Matousek, A. The Verification of Validity of the Low-Cost Laboratory Measuring Set for Analysis of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 485–489, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [48] Pavelka, T., Ptacek, M., Baxant, P. Photometrical Parameters of the Luminaire Used for Laboratory Measure of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 1181–1184, ISBN 978-80-214-4514-7.

# Curriculum Vitae

## Osobní data

Michal Ptáček, Ing.

Zikova 604/6

779 00 Olomouc

Narozen dne 10. 02. 1985 ve Šternberku  
svobodný, národnost česká

Tel.: +420 541 146 247

E-mail: ptacekm@feec.vutbr.cz, ptacekmic@gmail.com



## Vzdělání

- 2009 – 2014 doktorské studium na VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika
- 2007 – 2009 magisterské studium na VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Elektroenergetika
- 2004 – 2007 bakalářské studium na VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

## Zahraníční stáže

- 07/2014 University of Massachusetts, Lowell, Spojené státy americké
- 02/2012 – 06/2012 TEI of Crete, Branch of Chania, Řecko

## Praxe

- 09/2013 – dosud výzkumný asistent, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky
- 02/2012 – dosud technicko-hospodářský pracovník, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky
- 09/2010 – 12/2013 výzkumný asistent, VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, CVVOZE
- 2009 – dosud konzultant ve vzdělávací agentuře PhDr. Ludmila Hlavinková (LP-efekt), Olomouc
- 10/2009 – 01/2012 administrátor uživatelských aplikací, E.on Česká republika, s.r.o., divize Projekty a data měření

## Ostatní

- 2009 – 2014 Řešitel a spoluřešitel projektů (TAČR, FRVŠ, a další), Pedagogická činnost, Koordinátor projektů TAČR za ÚEEN
- Jazykové znalosti: Angličtina

Brno, 11. listopadu 2014

## Publikace autora

- [A.1] Ptacek, M., Pavelka, T., Novotny, J. The cooperation of fuel cells and renewable energy sources: A short review of operated energetics systems and their main deficiencies of pemfc models in hybrid systems. In *Electric Power Engineering (EPE), Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on*, vol. 1., Brno, Czech Republic, May 2014, pp. 363–366, ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [A.2] Kopicka, M., Ptacek, M., Toman, P. Analysis of the Power Quality and the Impact of Photovoltaic Power Plant Operation on Low-Voltage Distribution Network. In *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014*, Rakvere, Estonia, June 2014, pp. 99–102, ISBN 978-1-4799-5020-1.
- [A.3] Ptacek, M., Matousek, A. The Implementation of the Dynamic Experiments of the Low-temperature Fuel Cell Stack with the Buck DC/DC Converter. In *Proceedings of the 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2013*. Stará Lesná, Slovakia: Technical University of Košice, September 2013, pp. 200–203, ISBN 978-80-553-1441-9
- [A.4] Ptacek, M. The definition of input parameters for modelling of energetic subsystems. *EPJ Web of Conferences*, vol. 54, pp. 02 002.1–02 002.8, June 2013, ISSN 2100-014X.
- [A.5] Ptacek, M., Matousek, A. New Dynamic Model of Low-Temperature Fuel Cell Stack and the Micro-Cogeneration Systems. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 491–497, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [A.6] Ptacek, M., Mastny, P. The Investigation of Thermal Behaviour of the Low-Temperature Fuel Cell Stack by the Supplemented Dynamic Model. In *Recent Advances in Energy, Environment and Economic Development*. Paris, France: WSEAS Press, December 2012. pp. 160–165, ISBN 978-1-61804-139-5.
- [A.7] Ptacek, M., Pavelka, T., Matousek, A. The Verification of Validity of the Low-Cost Laboratory Measuring Set for Analysis of Low-Power Photovoltaic Modules. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*, vol. 1. Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Electrical Power Engineering, May 2012, pp. 485–489, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [A.8] Ptacek, M., Matousek, A. Modelling of Photovoltaic Array for Hybrid System. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011*, vol. 1. Ostrava, Czech Republic: VSB - Technical University of Ostrava, May 2011, pp. 1–4, ISBN 978-80-248-2393-5.
- [A.9] Mastný, P., Drápela, J., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Mišák, S. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Ročník č.1. Praha, Česká republika: České vysoké učení technické v Praze, Prosinec 2011, ISBN 978-80-01-04937-2, 256 s.
- [A.10] Ptáček, M., Novotný, J., Matoušek, A. Analýza fotovoltaičké části multienergetického grid-off systému s palivovým článkem. *Proceedings of the 1st International Scientific Conference Renewable Energy Sources 2010*. Tatranské Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, May 2010, s. 1–5, ISBN 978-80-89402-24-3.
- [A.11] Ptacek, M., Khisamutdinov, N. Comparison of Amount of Solar Energy of the Photovoltaic Panel in the Given Area. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012*. Tomsk, Russia: TPU Press, April 2010, pp. 14–16, ISBN 0-7803-8226-9

Úplný přehled autorových publikací je uveden v disertační práci



# Abstract

The thesis deals with the principle functions of low-temperature fuel cells with proton exchange membrane (PEMFC), photovoltaic sources (PVPP) and wind energy sources (WPP), along with solving their detailed mathematical expressions. In this work, the individual sources and their simulated models are analyzed in depth. The actual simulation is preceded by familiarization with important historical milestones in the development of fuel cells. Furthermore there is a basic classification of fuel cells and the characteristics of the cells used in the energy sectors. The text also provides information on projects that address the implementation of PEMFC as a primary or supplementary source of energy. Along with outlining the options for PEMFC as a perspective hydrogen technologies in the near future, the basic methods of hydrogen production and storage options are presented for the complexity. The work is exclusively focused on improving PEMFC mathematical models that under the hybrid system cooperate with renewable energy sources (RES). Part of the theses contains a short review of run or modeled concepts of hybrid systems in the energy sector. Using these models the main deficiencies of the models or of the whole PEMFC system can be identify. Specifications of the deficiencies lead to the creation of a new advanced dynamic PEMFC model that allows an analysis of the development of electrical and non-electrical quantities using long term tests. Furthermore, the thesis presents results of the experiments of thermal and dynamic behavior PEMFC, which were obtained from the additionally extended model with a reformer and the DC/DC converter. In this text there is a model of a photovoltaic module created, which is based on the nominal values parameterization. The model is subjected to basic experiments in which measured hydrometeorological data are used. If the hybrid system utilizes renewable energy sources, it is good to know the evolution of atmospheric conditions in the installation of these resources. Specifically for PVPP, publicly available databases containing information about solar radiation levels can be used for the selected location. Public databases are often used for initial design and manufacturing options for PVPP. An evaluation of the relevancy of public databases is performed based on a long-term observation of real measured data. Furthermore, these data are used for experiments on the photovoltaic module. Partially the text addresses the issue of the wind energy sources, however, it is simulated only on a simplified model of WPP. Created models of subsystems can be generally implemented as partial inputs hybrid systems in the future work.

The thesis was developed at Centre for Research and Utilization of Renewable Energy (CVVOZE) with the financial support of the National Programme for Sustainability and the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic under the project no. LO1210 - Energy for Sustainable Development and the project no. FEKT-S-14-2520 - New Technologies for Sustainable Development of Electrical Power Systems. The thesis was also generated under the project no. TA03020523 - Dynamic model of distribution network with the financial support of Technology Agency of the Czech Republic.